

# Verwendung von Leistungs - Lumineszenzdioden (LED) in der Strömungsmesstechnik

Diplomarbeit  
am Institut für Angewandte Optik und Elektronik  
Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik  
Fachhochschule Köln

Autor: Steffen Mößner  
Matrikelnummer: 11043937

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Welker  
Koreferent: Dr. phil. Christian Willert

Durchgeführt beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
am Institut für Antriebstechnik - Triebwerksmesstechnik (AT-TM)

Oktober 2009

# Use of High Power Light Emitting Diodes (LED) as Light Sources for Flow Diagnostics

Thesis

at the Institute of Applied Optics and Electronics  
Faculty of Information, Media and Electrical Engineering  
Cologne University of Applied Sciences

Author: Steffen Mößner

Matriculation Number: 11043937

First Reviewer: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Welker

Second Reviewer: Dr. Christian Willert (Ph.D)

Conducted at the German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt; DLR) at the Institute of Propulsion Technology -  
Engine Measurement Systems (AT-TM)

October 2009

## Kurzbeschreibung

Titel: Verwendung von Leistungs - Lumineszenzdioden (LED) in der Strömungsmesstechnik

Autor: Steffen Mößner

Referenten: Prof. Dr. Thomas Welker / Dr. Christian Willert

Zusammenfassung: Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen dokumentieren die Leistung von Hochleistungs-LEDs, die für kurze Zeit mit hohen Strömen übersteuert werden. Dies führt zu kurzen Lichtpulsen, welche über das Potential verfügen, laserbasierte Lichtquellen in der Strömungsdiagnostik und verwandten bildgebenden diagnostischen Methoden zu ersetzen. Die kurze Pulsdauer erlaubt es, die untersuchten LEDs mit Strömen zu betreiben, die signifikant oberhalb der bekannten Zerstörschwellen liegen und somit temporär einen signifikant erhöhten Lichtfluss zu erzeugen. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Ansteuerungsstrom und Lichtemission liegt bei etwa 0.3 bis 0.4 für grüne LEDs. Zugleich wurde das Spektrum des emittierten Lichts hin zu kürzeren Wellenlängen um bis zu 30 nm verschoben. Die Umsetzbarkeit von gepulster LED-Beleuchtung in der Strömungsdiagnostik wird in einem PIV-Experiment (Particle Image Velocimetry) demonstriert mit hoher Bildfrequenz sowie in einer schnellen Folge von Schattenwurf-Abbildungen mittels Kerosin-Spray in einer Druck-Brennkammer.

Stichwörter: LED, PIV, Particle Image Velocimetry, Schattenwurfverfahren, BOS, Background Oriented Schlieren, Spray Visualization, Strömungssichtbarmachung, Schlierenmesstechnik, gepulste Lichtquelle, Stromübertaktung, Hochgeschwindigkeitskamera

Datum: 28. Oktober 2009

## Abstract

Title: Use of High Power Light Emitting Diodes (LED) as Light Sources for Flow Diagnostics

Author: Steffen Mößner

Reviewers: Prof. Dr. Thomas Welker / Dr. Christian Willert

Summary: The herein described investigation documents the performance of high power light emitting diodes overdriven with high currents for short durations. This produces short light pulses that have the potential of replacing laser based light sources in fluid flow diagnostics and related image based diagnostic methods. The short duration of the pulse allows the investigated LEDs to be driven at currents significantly beyond the specified damage threshold temporarily producing a significantly increased luminous flux. The proportionality factor between drive current and light emittance typically is around 0.3 to 0.4 for green LEDs. At the same time the spectrum of the emitted light is shifted to shorter wavelengths by up to 30 nm. The feasibility of pulsed LED illumination in flow diagnostics is demonstrated in a high frame rate particle image velocimetry (PIV) experiment as well as in high frame rate shadowgraphy visualisations on a kerosene spray in pressurized combustor facility.

Keywords: LED, PIV, particle image velocimetry, shadowgraphy, BOS, background oriented Schlieren, spray visualization, flow visualization, Schlieren diagnostics, pulsed light source, impulse current, high-speed imaging

Date: October 28, 2009



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Thomas Welker und Herrn Dr. Christian Willert für die ausgezeichnete Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken.

Für die sehr schöne Zeit beim DLR möchte ich mich bei allen Kollegen der Abteilung Triebwerksmesstechnik bedanken, insbesondere bei Herrn Dr. Johannes Heinze und Herrn Dr. Michael Schroll für die vielen bereichernden Gespräche und ihre unermüdliche Hilfsbereitschaft.

Besonders möchte ich mich auch bei meiner Familie für Ihre Unterstützung während des Studiums bedanken. Und natürlich bei meinen Freunden für die wunderbare Studentenzeit.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Freundin Steffi bedanken, die auch in turbulenten Zeiten immer für mich da gewesen ist.

Steffen Mößner

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Historische Entwicklung der LED . . . . .	9
2.2	Funktionsweise der LED . . . . .	10
2.2.1	Bändermodell . . . . .	10
2.2.2	Rekombinationsprozesse . . . . .	12
2.2.2.1	Band-Band-Rekombination . . . . .	12
2.2.2.2	Rekombination unter Störstellenbeteiligung . . . . .	13
2.2.3	Halbleiterübergänge der LED . . . . .	13
2.3	Charakteristiken der LED . . . . .	15
2.3.1	Auswahl der Halbleitermaterialien . . . . .	15
2.3.2	Bauform und Strahlcharakteristik . . . . .	17
2.3.3	Photonenfluss und Wirkungsgrad . . . . .	18
2.3.3.1	Innerer Photonenfluss und innerer Wirkungsgrad . . . . .	18
2.3.3.2	Äußerer Photonenfluss und äußerer Wirkungsgrad . . . . .	19
2.3.4	Ansprechempfindlichkeit der LED . . . . .	20
2.3.5	Antwortzeit der LED . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Gepulster Betrieb von LEDs</b>	<b>23</b>
3.1	Auflistung der LEDs zur Vermessung . . . . .	23
3.2	LED-Treiber . . . . .	24
3.3	Grenzen der LED . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Vermessung der optischen Charakteristiken der LED</b>	<b>28</b>
4.1	Optische Vermessung mit einer Fotodiode . . . . .	28
4.2	Vermessung mit einem Spektrometer . . . . .	34
4.3	Vermessung mit einer Ulbrichtkugel . . . . .	39

<b>5</b>	<b>Anwendung von LEDs in der Strömungsmesstechnik</b>	<b>42</b>
5.1	Strömungsmesstechnische Verfahren und Versuche mit LED als Beleuchtungsquelle . . . . .	42
5.1.1	Particle Image Velocimetry (PIV) . . . . .	42
5.1.2	Schattenwurfverfahren . . . . .	49
5.2	Weitere mögliche strömungsmesstechnische Verfahren mit LED als Beleuchtungsquelle . . . . .	60
5.2.1	Schlierenmesstechnik . . . . .	60
5.2.2	Background Oriented Schlieren (BOS) . . . . .	61
5.2.3	Tomographic PIV/3-D Particle tracking . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>66</b>
A.1	Gegenüberstellung der radiometrischen und fotometrischen Größen . . . . .	66
A.2	Schaltplan des LED-Treibers . . . . .	67
A.3	Spektrale Augenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge . . . . .	68
A.4	Spektrale Empfindlichkeits-Kurve der Fotodiode FDS010 Si . . . . .	69
A.5	Abstrahlcharakteristik der Philips Luxeon III red und red-orange . . . . .	70
A.6	Abstrahlcharakteristik der Philips Luxeon V green und cyan . . . . .	71
A.7	Quantenausbeute der Kamera PCO SensiCam QE . . . . .	72
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>73</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>74</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>77</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>78</b>

# 1 Einleitung und Motivation

Bereits Mitte der 1980er Jahre dokumentierten STASICKI et al. [1] die Möglichkeit der Stromübersteuerung von Licht-Emittierenden Dioden (LED) zur Erzeugung kurzer Lichtpulse. Mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera gelang es, im Bereich von wenigen Mikrosekunden zeitlich aufgelöste Schlierenaufnahmen zu machen. Dieser spezielle Aufbau beruhte auf Vorwärtsstreuung – die Kamera blickte also in die Beleuchtungsquelle – was die Anordnung besonders lichtempfindlich machte. Aufgrund der geringen Leistung der damals zur Verfügung stehenden LEDs war es jedoch nicht möglich, kleinste Partikel, wie sie in der Strömungsmesstechnik notwendig sind, ausreichend nachzuweisen. Dennoch konnte durch die kurzzeitige Stromübersteuerung der LED ein in etwa proportionaler Anstieg der Lichtausbeute zum injizierten Strom nachgewiesen werden. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der LED war es zu Beginn der 1990er Jahre erstmals möglich, durch additive Farbmischung weißes Licht zu erzeugen. Etwa Mitte der 1990er Jahre konnte schließlich durch die Erfindung der blauen LED weißes Licht durch Lumineszenzkonversion (Zugabe von Leuchtstoffen) erzeugt werden. Dabei konnte man eine stetige Zunahme der Lichtausbeute von anfänglichen wenigen Lumen pro Watt auf bis zu 100 Lumen pro Watt bei den heutigen Leistungs-LEDs beobachten. Durch diesen Fortschritt gelang es, die Einsatzmöglichkeiten der LEDs in den vergangenen Jahren deutlich zu erweitern. In der optischen Strömungsmesstechnik, in der man üblicherweise mit lichtstarken Lasern arbeitet, verspricht man sich nun von dieser Leistungssteigerung, mit Hilfe gepulster LEDs eine ausreichende Lichtausbeute zu erzielen. Dazu sollen in der vorliegenden Diplomarbeit die Möglichkeiten zur Steigerung der Lichtausbeute durch den gepulsten Betrieb von LEDs untersucht und deren Einsatzmöglichkeiten für unterschiedliche strömungsmesstechnische Verfahren beleuchtet werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Historische Entwicklung der LED

Bereits im Jahr 1907 beobachtete ROUND Lichtemission aus einem Halbleiter - damals blieb diese Entdeckung jedoch weitgehend unbeobachtet. Drei Jahrzehnte später entdeckte DESTRIAU einen Leuchteffekt an Zinksulfid. Jedoch machte man sich die damaligen Erkenntnisse erst in den 1950er Jahren zu Nutze, als man begann, die Lumineszenz in halbleitenden Verbindungen intensiv und zielgerichtet zu erforschen [2]. Im Jahre 1962 – etwa zeitgleich mit der Erfindung des Lasers – wurde dann die erste LED von General Electric (GE, General Electric Company) entwickelt und schon bald in großtechnischer Produktion hergestellt. Ursprünglich war es nur möglich, rote LEDs herzustellen, es folgten grüne, orange und gelbe. 1993 gelang es erstmals, blaue Leuchtdioden herzustellen. Dieser Durchbruch ermöglichte es, durch additive Verfahren auch weißes Licht zu erzeugen [3]. Zwei Jahre später wurden dann erstmals LEDs eingeführt, die auf der Basis von Lumineszenzkonversion – Verwendung von Phosphoren als Leuchtschicht – weißes Licht erzeugen konnten. Gerade in den letzten Jahren konnte man bezüglich der Effizienz und Leistungsfähigkeit deutliche Fortschritte erzielen. Während es der Stand der Technik Mitte der 1990er Jahre lediglich ermöglichte, 10 lm/W zu erreichen, erzielt man heute bereits 130 lm/W. Dank der gesteigerten Lumenausbeute konnte sich das Einsatzgebiet der LEDs von ihrer ursprünglichen Funktion als Anzeigeelement bis in den Beleuchtungssektor ausweiten. So findet sie heutzutage vielfältige Verwendung, u. a. im Verkehrssektor oder in der Computerindustrie, in Ampeln, Scheinwerfern und als Hintergrundbeleuchtung in Flachbildschirmen. Aufgrund der geringen Leistungsaufnahme im Vergleich zum Lichtstrom erwartet man in den nächsten Jahren, dass der Markt für LEDs deutlich steigen wird [4]. Durch die im September 2009 in Kraft getretene EuP-Richtlinie (Eco-Design Requirements for Energy-Using Products, 2005/32/EG) wird dies entsprechend forciert. Beginnend mit diesem Zeitpunkt werden stufenweise Glühlampen bestimmter Energieklassen aus dem Handel genommen. Dies wird zwangsläufig dazu führen, dass sich andere Lichtquellen in Haushalt und Industrie bewähren müssen. Ob die Glühbirne

in naher Zukunft nun von der LED oder doch von anderen Beleuchtungsmitteln, wie etwa der Energiesparlampe, abgelöst werden wird, zeigen die kommenden Jahre.

## 2.2 Funktionsweise der LED

Die Funktion der LED beruht auf dem Prinzip der Lumineszenz. Darunter versteht man eine durch Zufuhr von Energie verursachte Emission von Licht bei der Rekombination angeregter elektronischer Zustände eines Stoffes [5]. Die Anregung erfolgt bei der Elektrolumineszenz durch elektrische Energie, bei der Photolumineszenz erfolgt sie durch Licht. Insbesondere für die Erzeugung von weißem Licht kommt – neben der Elektrolumineszenz im LED-Chip bei Lumineszenzkonversion in Leuchtstoffschichten auf dem Chip – die Photolumineszenz zum Einsatz. Generell werden beim Lumineszenzprozess durch eine Anregung Elektronen in einen energetisch höheren Zustand gebracht. Gehen diese Elektronen wieder in einen Zustand niedrigerer Energie über – dieser Vorgang nennt sich Rekombination – werden Photonen emittiert. Ist der Zustand mit der höheren Energie  $W_n$  und der Zustand mit der niedrigeren Energie  $W_m$ , so hat das ausgesandte Photon die Energie

$$h\nu = W_n - W_m. \quad (2.1)$$

Für ein tiefergreifendes Verständnis weiterer Vorgänge soll im Folgenden das Bändermodell kurz vorgestellt werden.

### 2.2.1 Bändermodell

Betrachtet man zwei identische Atome, die weit genug voneinander entfernt sind, so liegen die Energien der beiden Atome auf gleichem Niveau. Wird nun ein gewisser Atomabstand unterschritten, so treten die Elektronenhüllen miteinander in Wechselwirkung. Die Energieniveaus beider Atome verschieben sich leicht, was aufgrund des PAULI-Prinzips (Ausschlussprinzip<sup>1</sup>) geschieht.

Für eine Vielzahl von Atomen spalten sich die diskreten Energieniveaus der Atome zu Energiebändern auf. Aufgrund der dicht beieinander liegenden Energieniveaus können die Bänder als Kontinuum angesehen werden.

---

<sup>1</sup>Nach PAULI dürfen in einem abgeschlossenen System die Energieniveaus immer nur von maximal zwei Elektronen besetzt werden [5].

Von besonderem Interesse sind die energetisch höheren Bänder, da sich dort die Elektronen befinden, die an der elektrischen Leitung teilnehmen können. Das am höchsten gelegene Band eines Festkörpers, das vollständig mit Elektronen besetzt ist, wird als Valenzband bezeichnet. Darüber befindet sich das Leitungsband, das abhängig von der Besetzung mit Elektronen elektrische Isolatoren, Halbleiter und Leiter unterscheidet. Der Bereich, der zwischen diesen beiden Bändern liegt, wird als Energielücke oder auch als Bandabstand  $W_g$  bezeichnet. In Abbildung 2.1 ist die Bandstruktur eines Halbleiters zu sehen; durch Zuführen von thermischer Energie (z. B. Raumtemperatur) können Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband gehoben werden. Der Bandabstand zwischen den beiden Bändern wird dabei als sehr klein angenommen (Halbleiter, die Licht mit Hilfe der Band-Band-Strahlung (Kap. 2.2.2) emittieren, haben Lücken zwischen 1.59 und 3.27 eV (Elektronenvolt) [6]). Allgemein kann für die Halbleiter oder Isolatoren ein hinreichend großer Bandabstand

$$W_G > h\nu. \quad (2.2)$$

gefordert werden, der aufgrund einer hohen Ausbeute, die man bei den LEDs erzielen möchte, nicht zu groß sein darf [5].



Abbildung 2.1: Bandstruktur eines Halbleiters; Anregung von Elektronen (grau angedeutet) in das Leitungsband bei Raumtemperatur

Möchte man Energieniveaus innerhalb der Bandlücke erzeugen, so kann man einen Halbleiter durch Dotierung gezielt mit Fremdatomen ausstatten. Dabei unterscheidet man zwischen dem Akzeptorniveau (Akzeptor: Aufnahme eines Elektrons aus dem Valenzband) und dem Donatorniveau (Donator: Abgabe eines Elektrons an das Leitungsband). Beim Donatorniveau erreicht man die Entstehung eines Energieniveaus unterhalb des Leitungsbandes, indem man das Halbleitermaterial mit Fremdatomen dotiert, die eine größere Anzahl von äußeren Elektronen aufweisen (n-Halbleiter). Baut man hingegen Fremdatome mit einer geringeren Anzahl von äußeren Elektronen ein, so entsteht ein

Energieniveau oberhalb des Valenzbandes (p-Halbleiter). Die so entstandene Vielzahl an Elektronen im Leitungsband wird gelegentlich auch als Majoritätsladungsträger bezeichnet; die vereinzelt Löcher, die durch thermische Anregung im Leitungsband vorhanden sind, bezeichnet man auch als Minoritätsladungsträger. Dieser Sachverhalt kann entsprechend abgewandelt auch auf das Valenzband übertragen werden. Abbildung 2.2 zeigt ein mit Fremdatomen dotiertes Akzeptor- und Donatorniveau.

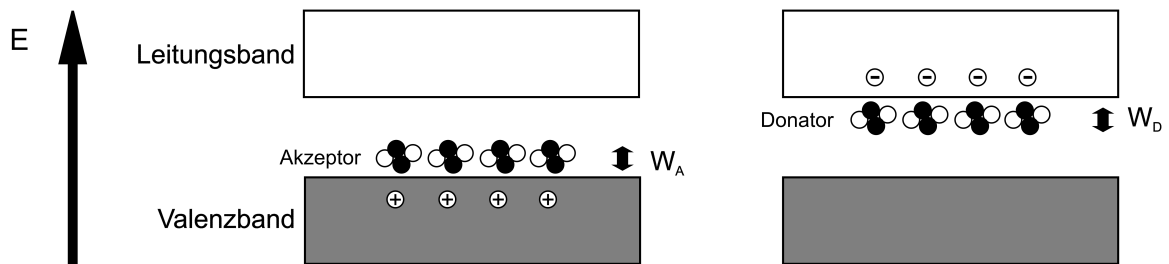


Abbildung 2.2: Mit Fremdatomen dotierte Bandlücken eines Akzeptor- und Donatorniveaus mit den Energien  $W_A$  und  $W_D$

Eine weitere Möglichkeit, die Bandstrukturen aufzuzeigen, besteht darin, die Bänder im Energie-Impuls-Raum darzustellen. Jedoch soll wegen der weitaus größeren Komplexität auf die Darstellung der quantentechnischen Sichtweise verzichtet werden.

## 2.2.2 Rekombinationsprozesse

Für LEDs sind die strahlenden Rekombinationsprozesse von Bedeutung. Die wesentlichen Prozesse sind die Band-Band-Rekombination und die Rekombination unter Störstellenbeteiligung:

### 2.2.2.1 Band-Band-Rekombination

Beim Zurückfallen eines Elektrons vom Leitungsband in das Valenzband wird überwiegend Energie in Form eines Photons abgegeben. Man unterscheidet zwischen direkten und indirekten (unter Phononenbeteiligung<sup>2</sup>) Übergängen und beobachtet beide Vorgänge sowohl in direkten als auch in indirekten Halbleitern. Ein indirekter Halbleiter kann zum Beispiel Silizium (Si) oder Germanium (Ge) sein. Direkte Übergänge kommen aber in indirekten Halbleitern eher selten vor. Generell sind die indirekten Halbleiter bei

<sup>2</sup>Phononen sind gequantelte Einheiten einer elastischen Gitterwelle, die den Kristall durchläuft [6].



der Band-Band-Rekombination unüblich, da sie nicht effektiv genug sind. Aber auch die Übergänge bei den direkten Halbleitern sind nicht besonders effizient. Eine wesentliche Ursache ist die Reabsorption der intern generierten Photonen. Daher macht man sich bei den LEDs die Beteiligung von Störstellen (Dotierung) zu Nutze. In den superhellen LEDs (die auch in dieser Arbeit verwendet werden) löst man dieses Problem durch eine zusätzliche dünne aktive Schicht mit kleinerem Bandabstand (Doppelheterostrukturen), die von der p- und n-Schicht des pn-Übergangs (siehe Kap. 2.2.3) eingeschlossen wird.

### 2.2.2.2 Rekombination unter Störstellenbeteiligung

Wesentlich effektiver ist der Vorgang der Rekombination unter Störstellenbeteiligung. Dieser Prozess kann zwischen Donator und Valenzband oder zwischen Leitungsband und Akzeptor ablaufen. Beide Prozesse sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

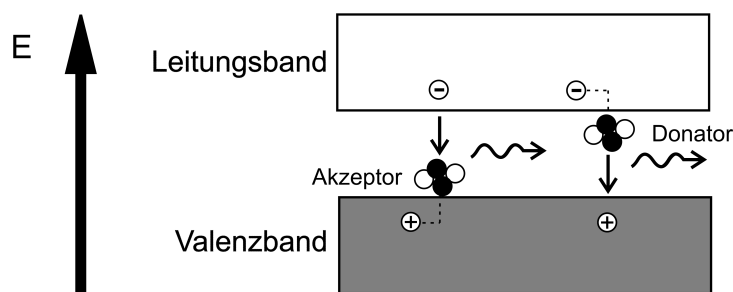


Abbildung 2.3: Rekombination unter Störstellenbeteiligung unter Aussendung von Photonen

Auch ein Übergang zwischen Donator und Akzeptor ist möglich (Inter-Störstellen-Rekombination). Findet die Rekombination innerhalb des atomaren Energieniveaus statt (Intra-Störstellen-Rekombination), so führt dies häufig durch die starke Wechselwirkung des Störstellenatoms mit dem Festkörper zu einer Verbreiterung des Emissionsspektrums.

Zieht man jeweils von der Bandlückenenergien  $W_g$  die Ionisierungsenergien der Störstellen ab, erhält man die Emissionsenergie der Strahlung.

### 2.2.3 Halbleiterübergänge der LED

Werden die mit Donatoren (n-leitend) und Akzeptoren (p-leitend) dotierten Bereiche miteinander kombiniert, erhält man ein Halbleiterbauelement mit einem pn-Übergang.

Durch das resultierende gemeinsame FERMI-Niveau  $W_F$ <sup>3</sup> verschieben bzw. verbiegen sich die Bandkanten. Dabei stellt sich durch Ladungsausgleich ein Gleichgewichtszustand ein. Der Übergangsbereich zwischen den getrennten Ladungen wird als Verarmungszone (Raumladungszone, RLZ) bezeichnet. In der nachfolgenden Skizze (Abb. 2.4) ist zu erkennen, dass durch die Verschiebung der Ladungen die p-dotierte Seite auf einem höheren Niveau liegt als die n-dotierte Seite.

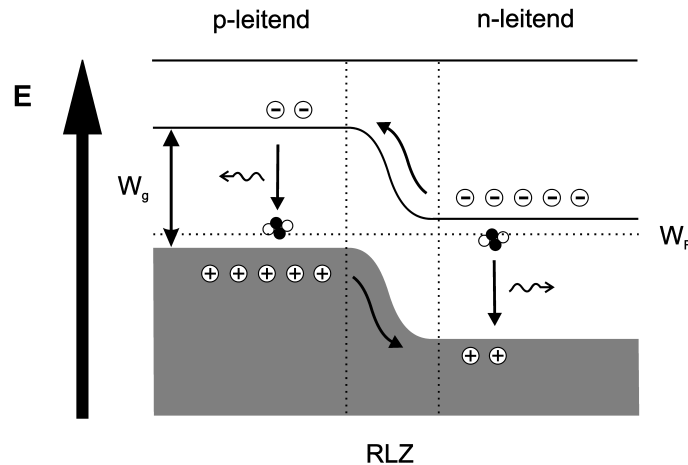


Abbildung 2.4: pn-Übergang einer LED

Bei angelegter Spannung in Durchlassrichtung erhält man einen Ladungsüberschuss von Elektronen auf der positiven Seite und einen Löcherüberschuss auf der negativen Seite. Während der folgenden Rekombination von Elektronen und Löchern wird Licht emittiert. Die Rekombination kann dabei nach den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Möglichkeiten erfolgen.

Für eine verbesserte Lichtausbeute von LEDs besteht die Möglichkeit, für den Bau von Halbleitern anstatt gleicher Materialien (Homostruktur) unterschiedliche Materialien (Heterostruktur) zu verwenden. Dieses als „band gap engineering“ bezeichnete Verfahren führt zu individuellen Bandlücken. Neben den Heterostrukturen, die aus Übergängen wie pN und Pn oder auch pP und nN gebildet werden können (der Großbuchstabe kennzeichnet den größeren Bandabstand), gibt es noch die effizienteren Doppelheterostrukturen (DH-Strukturen), wie etwa PpN oder PnN. Bei diesen Übergängen kommt es im Valenz- und Leitungsband zur Ausbildung von sogenannten Potentialmulden. Die in diesen Mulden eingeschlossenen Elektronen (kontrollierter Ladungsträgereinschluss)

<sup>3</sup>Das FERMI-Niveau (FERMI-Energie) bezeichnet einen gemeinsamen Parameter, der sowohl die Verteilung der Elektronen, als auch die Verteilung der Löcher im Valenzband beschreibt [6].

können nur durch Rekombinationsprozesse den Potentialtopf wieder verlassen, was in Kombination mit einer sehr hohen Injektionseffizienz (Effizienz bei der Injektion von Majoritätsladungsträgern) zu einer sehr effizienten LED (Superlumineszenzdiode) führt. Durch den Doppelhetero-Aufbau entsteht quasi ein lichtführender Kanal, über den das Licht seitlich emittiert wird. Abbildung 2.5 zeigt die Prinzipskizze eines solchen Kantenemitters.

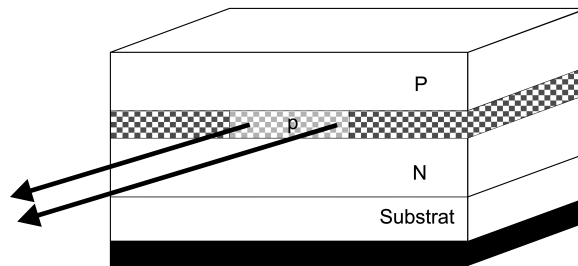


Abbildung 2.5: Kantenemitter (PpN), bei dem die Pfeilrichtung das emittierte Licht aus der p-Schicht angibt [6]

Eine Doppelheterostruktur muss nicht zwangsläufig zum Kantenemitter führen; es besteht auch die Möglichkeit, durch technische Veränderungen einen Flächenemitter herzustellen.

## 2.3 Charakteristiken der LED

Um einen Überblick über die wesentlichen Merkmale von LEDs zu bekommen, sollen im Folgenden einige technische Gegebenheiten vorgestellt werden.

### 2.3.1 Auswahl der Halbleitermaterialien

Um die LEDs hinsichtlich ihres emittierenden Spektrums und ihres Emissionswirkungsgrades zu beeinflussen, werden verschiedene Halbleitermaterialien eingesetzt. Dabei sind nicht alle Materialien technologisch gleich gut zu beherrschen, daher wird anhand dieses Kriteriums häufig schon eine engere Vorauswahl getroffen. In Tabelle 2.1 wird eine Reihe von wichtigen Materialien aufgezählt.

Material der strahlungsaktiven Zone	Farbeindruck	emittierte Wellenlänge [nm]
InGaN	(UV), blau, grün	370-550
SiC	blau	480
GaP	grün	565
GaAsP	rot, orange, gelb	590-650
AlInGaP	rot, orange, gelb	555-650
GaAlAs	rot, (infrarot)	650

Tabelle 2.1: Häufig verwendete Halbleiter-Materialien [5, 6]

Für die Superlumineszenzdiolen, welche die Doppelheterostrukturen aufweisen (siehe Kap. 2.2.3), werden z.B. die InGaN (Indiumgalliumnitride) und die AlInGaP (Aluminiumindiumgalliumphosphide) verwendet. Abbildung 2.6 zeigt den Aufbau einer AlInGaP-LED, die Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 555$  bis  $650$  nm emittiert. Der Index  $x$  gibt dabei die prozentualen Anteile der Komponenten an. Über diesen Parameter werden die Emissionswellenlängen  $\lambda$  bzw. die Bandlücken  $W_g$  gesteuert.

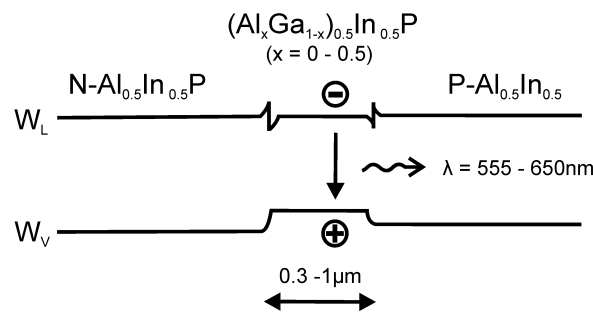


Abbildung 2.6: Aufbau der DH-Struktur einer AlInGaP-LED [5]

Für die superhellen LEDs muss dabei zuerst die Doppelheterostruktur auf ein GaAs-Substrat aufgewachsen werden. Anschließend wird durch ein Austauschverfahren unter starkem Druck und hoher Hitze ein GaP-Substrat „angeschweißt“ (engl.: bonded). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, zwischen der DH-Struktur und dem Substrat einen so genannten BRAGG-Reflektor<sup>4</sup> anzubringen. Dieser besteht aus 5 bis 20  $\lambda/4$ -Schichten, jeweils abwechselnd eine  $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ - und eine  $Al_{0.5}In_{0.5}P$ -Schicht. Hierbei entsteht eine Art Spiegel mit sehr hohem Reflexionsvermögen, basierend auf den „Störungen“ an den Grenzflächen (konstruktive Interferenz der in Rückwärtsrichtung gestreuten Lichtwellen) [6].

<sup>4</sup>Für den BRAGG-Reflektor gilt die BRAGG-Bedingung:  $2d \sin \theta = z\lambda$  (mit der Ordnungszahl  $z = 1, 2, \dots$ ). Dabei zeigen zwei Lichtwellen ( $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ ), die an zwei parallelen Schichten (mit Abstand  $d$ ) reflektiert werden und mit dem Winkel  $\theta$  ein- bzw. ausfallen, eine verstärkte Reflexion [5].

### 2.3.2 Bauform und Strahlcharakteristik

Abbildung 2.5 in Kapitel 2.2.3 zeigt den typischen Aufbau – die planare Halbleiterstruktur – eines Kantenemitters eines LED-Chips (DH-Struktur). Diese planare Struktur findet ebenfalls Anwendung bei den flächenemittierenden LEDs (DH- und pn-Struktur). Bei den Flächenemittern wird die Strahlung flächenhaft über die gesamte Oberfläche des Halbleiters hinweg nach außen abgegeben. Über reflektierende Rückseitenkontakte kann der Wirkungsgrad zusätzlich erhöht werden.

Diese Halbleiter werden u. a. in der so genannten SMD-Bauweise (Surface Mounted Device) hergestellt. Dabei wird die LED direkt mit ihren elektrischen Kontakten auf eine Trägerplatte gelötet, die gleichzeitig als Kühlkörper fungiert. In Abbildung 2.7 sind zwei solche Hochleistungs-LEDs, die Luxeon V Star und die Phlatlight CBT-120 zu sehen, die Bestandteil der Untersuchungen in dieser Arbeit sind.

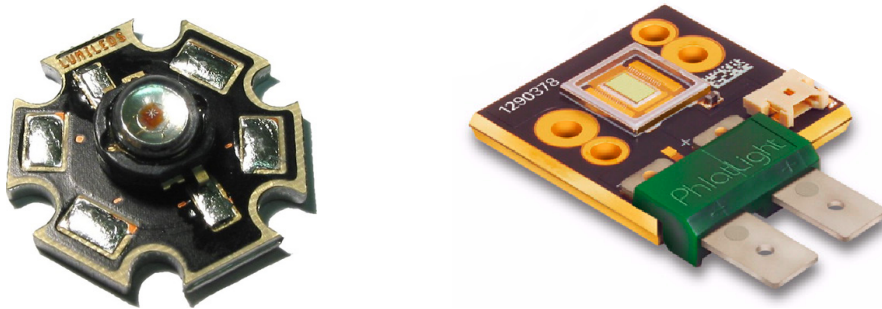


Abbildung 2.7: Philips Luxeon V Star (links); aus [7] S. 1 und Luminus Phlatlight CBT-120 (rechts); aus [8] S. 1

Die SMD-Bauform unterscheidet sich grundlegend von der klassischen LED, mit langem und kurzem Bein, die häufig nur die Funktion als Anzeigeelement erfüllen soll. Bei diesen beispielsweise mit Epoxidharz [9] (dient gleichzeitig als Optik und Schutzmantel) eingeschlossenen LEDs ist der Halbleiterkristall in einer Art Reflektorwanne (Kathode) eingebettet, von der aus mit einem dünnen Draht (Bonddraht) eine Verbindung zur Anode hergestellt wird. Bevor das Halbleitermaterial einer LED mit einer „Optik“ bestückt wird, wirkt die Emissionsverteilung wie bei einer Punktlichtquelle, die eine nahezu isotrope (richtungsunabhängige) Strahlungsverteilung zeigt. Erst durch die industrielle Weiterverarbeitung, bei der eine Glas- bzw. Kunststoffkuppe (Dome) oder auch eine Linse aufgesetzt bzw. angegossen wird, zeigt sie ein richtungsabhängiges Strahlprofil. Der durch die Form des Domes oder einer Linse resultierende Abstrahlwinkel  $\Phi$  wird bei halber Intensität bestimmt [5]. Die LED kann dabei eine wie in Abbildung 2.8

gezeigte parabolische Abstrahlrichtung aufweisen, wie sie u. a. bei den Lumiled Phlat-light LEDs vorkommt. Durch eine andere Formgebung des Domes (kegel-, rechteck-, spitzförmig etc.) können hemisphärische- oder auch planare Strahlungsverteilungen erzeugt werden. Anhang A.5 und A.6 zeigt die lambertsche Abstrahlcharakteristik einer Philips Luxeon III, red und Philips Luxeon V, green.

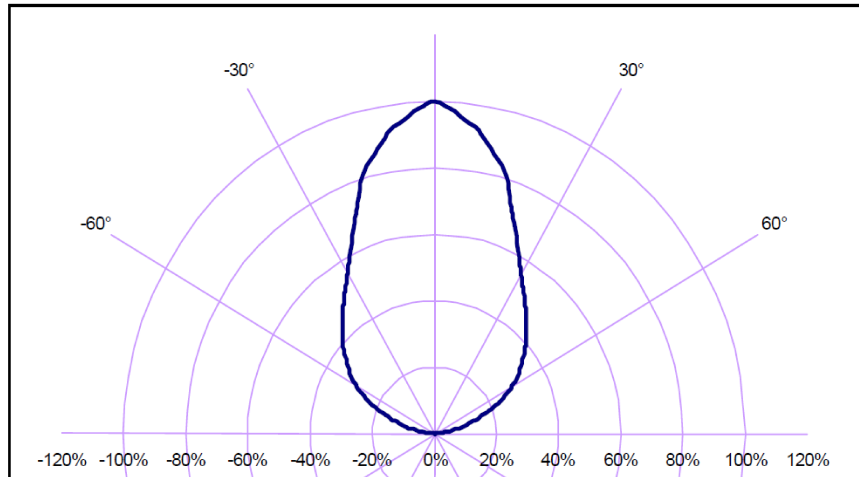


Abbildung 2.8: Abstrahlcharakteristik einer grünen CBT-40 und CBT-120; Zusammenhang der Intensität [%] und des Abstrahlwinkels [°]; aus [8] S. 10

Für die Versuche in der vorliegenden Arbeit ist es primär von Bedeutung, möglichst Leistungsstarke LEDs zu verwenden. Durch die unterschiedlichen Strahlcharakteristiken der auf dem Markt erhältlichen LEDs, die auch hinsichtlich des emittierenden Spektrums variieren, musste immer ein Kompromiss bezüglich der Leistung und Kollimierung eingegangen werden. Letztere bringt insbesondere bei einer lambertschen Verteilung Leistungsverluste mit sich.

## 2.3.3 Photonenfluss und Wirkungsgrad

### 2.3.3.1 Innerer Photonenfluss und innerer Wirkungsgrad

In [9] wird folgender Zusammenhang beschrieben: Wird eine Diode in Durchlassrichtung gepolt, dann führt der injizierte Gleichstrom  $i$  zu einer Zunahme der Ladungsträgerkonzentration  $\Delta n$ . Diese Ladungsträgerkonzentration bewirkt wiederum im Volumen  $V$  der aktiven Region eine strahlende Rekombination. Die Region des Übergangs, die von der Gesamtzahl an Ladungsträgern pro Sekunde durchquert wird, ist  $i/e$  (dabei ist  $e$  der Betrag der Elektronenladung).

Daraus folgt, dass die Injektionsgeschwindigkeit  $R$  (Geschwindigkeit der Elektron-Loch-Paare [Paare/(cm<sup>3</sup>s)]) der Ladungsträgerinjektionen gleich

$$R = \frac{i/e}{V} \quad (2.3)$$

ist.

Wenn für  $R = \Delta n / \tau$  gilt, wobei  $\tau$  die Gesamtzeit der strahlenden und nichtstrahlenden Rekombination ist, dann gilt

$$\Delta n = \frac{(i/e)\tau}{V}. \quad (2.4)$$

Der Photonenfluss  $\Phi$  (Photonen pro Sekunde) errechnet sich mit  $\Phi = \eta_i R V$  ( $\eta_i$  ist die innere Quantenausbeute bzw. der innere Wirkungsgrad) aus

$$\Phi = \eta_i \frac{i}{e}. \quad (2.5)$$

Die Gleichung 2.5 besagt, dass nur ein Teil  $\eta_i$  des injizierten Elektronenflusses  $i/e$  in einen Photonenfluss umgewandelt wird. Daher bezeichnet die innere Quantenausbeute  $\eta_i$  das Verhältnis des erzeugten Photonenflusses zum injizierten Elektronenfluss.

Durch die in Kapitel 2.2.3 bereits angesprochenen Doppelheterostrukturen, die eine höhere Ladungsträgerkonzentration erzeugen, was schließlich die strahlende Rekombination verstärkt, kann der innere Photonenfluss erhöht werden.

### 2.3.3.2 Äußerer Photonenfluss und äußerer Wirkungsgrad

Durch die Gleichung

$$\Phi_o = \eta_A \Phi = \eta_A \eta_i \frac{i}{e} \quad (2.6)$$

wird angegeben, wie der äußere Photonenfluss  $\Phi_o$  einer Leuchtdiode mit dem inneren Photonenfluss  $\Phi$  verknüpft ist. Der Auskopplungswirkungsgrad  $\eta_A$  gibt dabei den Teil des inneren Photonenflusses an, der aus der Struktur des Halbleiters ausgekoppelt wird.

Durch Zusammenfassen der beiden Prozesse in eine einzige Quantenausbeute ergibt sich der äußere Wirkungsgrad  $\eta_e$  zu

$$\eta_e \equiv \eta_A \eta_i. \quad (2.7)$$

Somit kann der Photonenfluss am Ausgang vereinfacht durch

$$\Phi_o = \eta_e \frac{i}{e} \quad (2.8)$$

beschrieben werden und der äußere Wirkungsgrad  $\eta_e$  beschreibt das Verhältnis des äußeren Photonenflusses  $\Phi_o$  zum injizierten Elektronenfluss  $i/e$ .

Die optische Leistung  $P_o$  errechnet sich direkt über die Energie  $h\nu$  eines Photons zu

$$P_o = h\nu \Phi_o = \eta_e h\nu \frac{i}{e}. \quad (2.9)$$

Die Werte für den inneren Wirkungsgrad  $\eta_i$  von LEDs können zwischen 50 % und knapp 100 % betragen. Der äußere Wirkungsgrad hingegen liegt normalerweise unter 50 %. Der Auskopplungswirkungsgrad  $\eta_A$  für effektiv entworfene Bauelemente kann bis zu 50 % betragen.

Ein weiteres Maß für die Leistung ist der Leistungsumwandlungswirkungsgrad  $\eta_L$ . Das Verhältnis der emittierten optischen Leistung  $P_o$  zur investierten elektrischen Leistung ist

$$\eta_L \equiv \frac{P_o}{iV} = \eta_e \frac{h\nu}{eV}. \quad (2.10)$$

$V$  gibt dabei den Spannungsabfall über dem Bauelement an. Nimmt man für  $h\nu \approx eV$  an, ist  $\eta_L \approx \eta_e$ .

### 2.3.4 Ansprechempfindlichkeit der LED

Das Verhältnis der emittierten optischen Leistung  $P_o$  einer LED zum injizierten Strom  $i$  ist definiert als die Ansprechempfindlichkeit  $\mathfrak{R}$ . Mit der Gleichung 2.9 erhält man

$$\mathfrak{R} = \frac{P_o}{i} = \frac{h\nu \Phi_o}{i} = \eta_e \frac{h\nu}{e}. \quad (2.11)$$



Für eine anschauliche Darstellung mit gebräuchlichen Einheiten kann man auch schreiben

$$\frac{\mathfrak{R}}{W/A} = \eta_e \frac{1.24}{\lambda_o/\mu m}. \quad (2.12)$$

Mit der Annahme von  $\lambda = 1.24 \mu m$  und einem äußeren Wirkungsgrad von  $\eta_e = 1$  erhält man  $\mathfrak{R} = W/A$ . Somit würde man für einen Injektionsstrom von 1 mA die volle optische Leistung von 1 mW erhalten. Entsprechend erhielte man die Hälfte der optischen Leistung, also 0.5 mW, wenn man  $\eta_e$  mit 0.5 veranschlagen würde. Die Proportionalität der Ausgangsleistung  $P_o$  zum injizierten Strom  $i$  gilt allerdings nur für einen begrenzten Bereich. Für höhere Ströme, wie sie in den später beschriebenen Messungen (siehe Kap. 4) verwendet werden, bricht die Proportionalität aufgrund von Sättigung ein.

### 2.3.5 Antwortzeit der LED

Für die Antwortzeit (Anstiegszeit) einer LED gilt im folgenden der in [9] beschriebene Zusammenhang: Die in der Beleuchtungstechnik verwendeten LEDs sind bezüglich ihrer Anstiegszeit in der Regel durch die  $RC$ -Zeitkonstante (Fläche des Übergangs bzw. die Kapazität ist groß) des Bauelements begrenzt. In der optischen Nachrichtentechnik hingegen ist die Anstiegszeit meist durch die Lebensdauer  $\tau$  der injizierten Minoritätsladungsträger, die verantwortlich sind für die strahlende Rekombination, begrenzt. Ist die Injektionsgeschwindigkeit  $R$  hinreichend klein, kann der Prozess der Injektion/Rekombination durch eine lineare Differentialgleichung (DGL) erster Ordnung beschrieben werden, was der Antwort auf sinusförmige Signale entspricht. Aus der Gleichung für den injizierten Strom  $i = i_0 + i_1 \cos(\Omega t)$  folgt für die ausgestrahlte Optische Leistung  $P = P_0 + P_1 \cos(\Omega t + \varphi)$ . Damit sich  $P$  linear mit  $i$  ändert, soll dabei der Strom  $i_1$  gering sein. Dadurch nimmt die zu der optischen Leistung gehörende Übertragungsfunktion  $H(\Omega) = (P_1/i_1) \exp(i\varphi)$  die für einen  $RC$ -Kreis typische Form

$$H(\Omega) = \frac{\mathfrak{R}}{1 + i\Omega\tau} \quad (2.13)$$

an.

Mit der Anstiegszeit  $\tau$  der LED und der 3 dB Bandbreite, die  $B = 1/2\pi\tau$  beträgt, kann durch Reduktion von  $\tau$  eine größere Bandbreite erreicht werden. Dabei sind die Beiträge der strahlenden Lebensdauer  $\tau_s$  und der nichtstrahlenden Lebensdauer  $\tau_{ns}$  zu berücksichtigen, die über die Beziehung  $1/\tau = 1/\tau_s + 1/\tau_{ns}$  in Zusammenhang gebracht

werden. Eine Verkürzung von  $\tau_{ns}$  hat die Eigenschaft zur Folge, dass sich die innere Quantenausbeute ( $\eta_i = \tau/\tau_s$ ) reduziert. Stattdessen bietet es sich an, das Produkt aus Bandbreite und innerer Quantenausbeute ( $\eta_i B = 1/2\pi\tau_s$ ) zu maximieren. Dies ist möglich, indem man  $\tau_s$  reduziert, ohne dabei gleichzeitig  $\tau_{ns}$  zu reduzieren. Erreicht wird dies durch eine bestimmte Auswahl der Halbleitermaterialien (siehe auch Kap. 2.3.1) und des Dotierniveaus. Die typischen Anstiegszeiten von Leuchtdioden liegen zwischen 1 und 50 ns bei Bandbreiten von mehreren hundert MHz.

## 3 Gepulster Betrieb von LEDs

Im praktischen Teil der Diplomarbeit soll unter anderem eine Steigerung der Lichtausbeute an gepulsten LEDs gezeigt werden. Die Untersuchungen werden dabei an verschiedenen LEDs durchgeführt. Es kommen sowohl LEDs zum Einsatz, die über den normalen Handel zu erwerben sind, als auch Leistungs-LEDs, die für spezielle Anwendungszwecke (wie z. B. LED-Projektoren) konzipiert werden und nicht im regulären Handel erhältlich sind. Die LEDs werden mit unterschiedlichen Treibern angesteuert, die Pulse bis in den zweistelligen Ampere-Bereich erzeugen können (Pulsbreiten von wenigen  $\mu\text{s}$ ). Die ersten Messungen erfolgen mit einer vorgespannten Fotodiode, im weiteren Verlauf sollen auch noch andere Fotodioden verwendet werden. Die Messergebnisse werden mit einem digitalen Speicheroszilloskop erfasst und ausgewertet. Um eine Aussage über die Lichtausbeute, unabhängig von der Abstrahlcharakteristik treffen zu können, werden die LEDs zusätzlich mit einer ULBRICHTkugel vermessen. Dabei werden die LEDs ebenfalls im gepulsten Betrieb mit ansteigenden Strömen betrieben und die resultierenden Lichtausbeuten miteinander verglichen. Von Interesse ist auch die Bestimmung der Spektren bei unterschiedlicher Ansteuerung. Im Folgenden sollen die zu untersuchenden LEDs, deren Treibertechologie und Grenzen vorgestellt werden.

### 3.1 Auflistung der LEDs zur Vermessung

Type	$\lambda_d$ [nm]	$I_f$ [mA]	$U_f$ [V]
Luxeon III Star LXHL-LH3C, red-orange	617	1400	2.95
Luxeon III Star LXHL-LD3C, red	627	1400	2.95
Luxeon V Star LXHL-LE5C, cyan	505	1000	6.84
Luxeon V Star LXHL-LM5C, green	530	1000	6.84
Phlatlight CBT-40, green	526	10000	4.9
Phlatlight CBT-120, green	526	30000	4.9

Tabelle 3.1: Übersicht der LEDs die in der vorliegenden Arbeit vermessen werden (d=dominant, f=forward); aus [10, 7, 11, 8]

Die in Tabelle 3.1 dargestellten LEDs werden für die verschiedenen Untersuchungen in dieser Arbeit herangezogen. Die erste Spalte benennt die Hersteller-Bezeichnung des jeweiligen LED-Typs. Die nächste Spalte bezeichnet die dominante Wellenlänge  $\lambda_d$ ; diese Wellenlänge wird aus den x und y Farbkoordinaten eines CIE-Diagramms (CIE 1931; Commission Internationale de l'Éclairage) ermittelt. Sie dient als Maß für den Farbeindruck, den das menschliche Auge von der LED gewinnt. Die Wellenlängen gelten für den in Tabelle 3.1 zugehörigen Durchlassstrom  $I_f$  bei einer vorherrschenden Sperrschichttemperatur von 25 °C. Die dritte Spalte kennzeichnet die Spannung  $U_f$ , bei der die LED idealerweise lt. Hersteller betrieben werden soll. In den Datenblättern der Hersteller sind oft noch weitere Werte angegeben, die die LEDs noch genauer charakterisieren. Aufgrund des beträchtlichen Umfangs dieser Angaben wird auf eine Darstellung in der vorliegenden Arbeit verzichtet.

## 3.2 LED-Treiber

Für den Betrieb der LEDs werden unterschiedliche Treiber eingesetzt. Zum Einsatz kommt ein Lichtimpulsgenerator, der Ende der 1980er Jahre am damaligen Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen (jetzt: DLR Göttingen) entwickelt wurde, ein Laser-Dioden-Treiber des Herstellers PicoLAS sowie ein Treiber, der am hiesigen DLR-Standort für Triebwerksmesstechnik entwickelt wurde. Abbildung 3.1 zeigt ein häufig verwendetes Schaltungskonzept für den gepulsten Betrieb von LEDs bzw. für andere kurzzeitig betriebene Stromverbraucher.

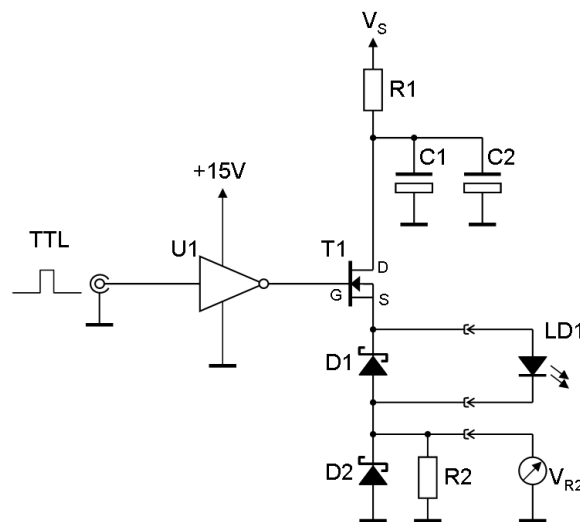


Abbildung 3.1: Schaltungskonzept für LED-Pulser

Grundlage aller Treiber ist ein schnell schaltender Transistor. Über die Versorgungsspannung  $V_S$  (ca. 15 bis 30 V) werden die Kondensatoren C1 und C2 aufgeladen. Ein eingangsseitig angelegter TTL-Puls (Transistor-Transistor-Logik) wird über die MOSFET<sup>1</sup> Treiberstufe U1 (z. B. ICL7667 oder TC4429) verstärkt und führt zur schnellen Durchschaltung des MOSFET Transistors T1 (z. B. IRFB4110 oder IRFP4468) und damit zur Entladung der Kondensatoren über die an T1 angeschlossene LED LD1. Die Dauer des Entladungsvorgangs entspricht dabei der eingangsseitig vorgegebenen Pulsbreite. Der durch die LED fließende Strom wird über den Widerstand R2 (typ. 0.05 bis 0.1  $\Omega$ ) an Masse abgeleitet. Der dabei auftretende Spannungsabfall  $V_{R2}$  kann z. B. per Oszilloskop gemessen und zur Bestimmung des LED Stroms  $I_f$  verwendet werden. Der Vorwiderstand R1 dient dabei zum Schutz der Spannungsquelle  $V_S$  falls diese nicht den für den Dauerbetrieb der LED notwendigen Strom  $I_f$  liefern kann. Zum Schutz sowohl der LED LD1, als auch des Schalttransistors T1 vor negativen Überschwingungsströmen während der schnellen Schaltvorgänge, werden schnell schaltende SCHOTTKYdioden D1 und D2 (z.B. BYT01-400 oder 1N5818) in umgekehrter Hauptstromrichtung verwendet. Bei der Wahl der Kondensatoren C1 und C2 ist darauf zu achten, dass diese einen möglichst geringen Innenwiderstand (innerer Verlustwiderstand eines Kondensators, ESR; Equivalent Series Resistance) aufweisen. Eine Kombination aus Folienkondensator und Elektrolytkondensator ermöglicht eine schnelle Bereitstellung von hohen Strömen durch C1, die durch den Elektrolytkondensator C2 nachgehalten werden können.

Während dieser Aufbau für Anwendungen mit niedrigen Schaltströmen bei vergleichsweise niedrigen Strömen leicht zu realisieren ist, sind für die hier beschriebenen Anwendungen Spitzenströme von 50 bis 200 A bei Pulsbreiten im Mikrosekundenbereich erforderlich. Dies macht einen möglichst kompakten Aufbau der Elektronik mit kurzen Leitungslängen und induktionsarmen Komponenten zwingend erforderlich, da eine ungünstige Umsetzung schnell zur Zerstörung des Treibers oder der daran angeschlossenen LED führen kann (siehe Kap. 3.3).

Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, werden im Laufe dieser Arbeit unterschiedliche Treiber eingesetzt. Bei den ersten Versuchen, bei denen LEDs mit hohen Strömen gepulst werden, kommt der Treiber des DLR Köln zum Einsatz. Mit diesem Treiber können Ströme von bis zu 30 A erzeugt werden. Mit dem anschließend verwendeten Treiber des DLR Göttingen können Pulse bis zu 10 A erzeugt werden. Bei beiden Treibern kann die maximale Breite der Pulse zwischen 50 ns und 10  $\mu$ s variiert werden und dabei eine

---

<sup>1</sup>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

maximale Impulswiederholungsrate von 2 MHz (begrenzt durch die Verlustleistung der LED) bereitstellen. Mit diesen Treibern können erste Abschätzungen gemacht werden, ob es möglich ist, die LEDs mit noch höheren Strömen zu betreiben und ob ein weiterer Leistungsanstieg zu erwarten ist. Für die Auswahl an Messreihen, die ausgewertet werden und in die Ergebnisse einfließen sollen, wird der kommerzielle Leistungstreiber von PicoLAS (Modell LDP-V 50-100) verwendet. Dieser ist speziell für den getakteten Betrieb von Laserdioden ausgelegt und liefert Ströme von bis zu  $I_f = 50$  A bei Anstiegszeiten von  $t_{\text{rise}} \approx 3$  ns. Abbildung 3.2 zeigt den Treiber von PicoLAS gemeinsam mit der Leistungs-LED Phlatlight CBT-40.

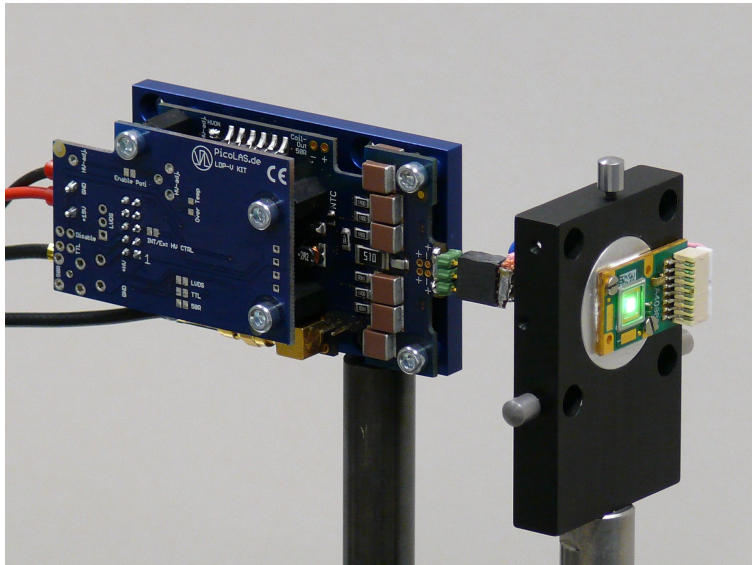


Abbildung 3.2: Treiber PicoLAS LDP-V 50-100 V3 mit Leistungs-LED Phlatlight CBT-40, green

Der Treiber ist für eine maximale Pulsbreite von ca.  $1 \mu\text{s}$  ausgelegt; d.h. bei deutlich längeren Pulsen ist der exponentielle Spannungsabfall von der versorgungsseitigen Kondensatorbank signifikant und erschwert damit eine genaue Messung der LED-Charakteristiken bei längeren Pulsdauern (Pulsdauer  $> 10 \mu\text{s}$ ).

Details zum genauen Aufbau der Schaltung des Treibers LDP-V 50-100 V3 von PicoLAS können dem Schaltplan in Anhang A.2 entnommen werden.

### 3.3 Grenzen der LED

Am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR Göttingen wird derzeit an der Entwicklung eines neuen Treibers gearbeitet, der die LEDs mit höheren Strömen über

den Zeitraum von mehreren  $\mu\text{s}$  betreiben kann, als dieses mit kommerziellen Treibern möglich ist. Des Weiteren versucht man, die Schaltungen nach eigenen Vorgaben zu konzipieren. Im Zuge dieser Entwicklungsarbeiten wurde eine LED Phlatlight CBT-120 zerstört. Abbildung 3.3 zeigt die zerstörte LED, deren Kontaktdrähte bei einem Impulsbetrieb von  $I_f = 100\text{ A}$  und einer Pulsdauer von  $30\text{ }\mu\text{s}$  zerstört wurden.

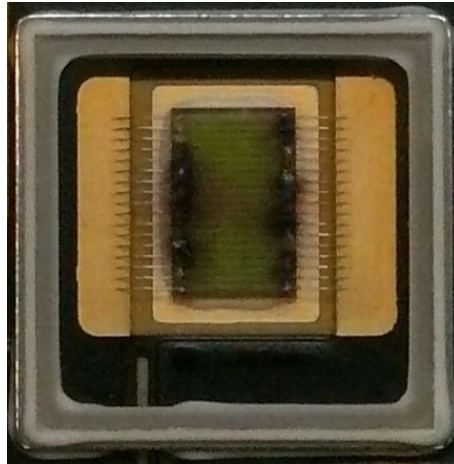


Abbildung 3.3: Zerstörte Leistungs-LED Phlatlight CBT-120, green

Die kleinen schwarzen Bereiche auf der zerstörten LED resultieren aus dem verdampften Material der Kontaktdrähte, das sich auf der Scheibe angelagert hat. Der Grund der Zerstörung der LED war ein unzureichender Schutz vor negativen Impulsen (z. B. das Fehlen der SCHOTTKYdioden D1 und D2; siehe Kap. 3.2) während der Schaltvorgänge. Durch die entsprechende Modifikation des Treibers mit Schutzdioden konnte nachfolgend ein Pulsbetrieb der LED bei Strömen von über  $I_f = 200\text{ A}$  gewährleistet werden. Um weitere Schutzvorkehrungen für die neu entwickelte Treibertechnologie zu integrieren, werden aktuell weitere, systematischere Messungen der Zerstörschwelle (durch Impulsströme) an einer Reihe von Leistungs-LEDs durchgeführt.

Das Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen überließ dem Institut für Antriebstechnik in Köln freundlicherweise die zerstörte LED; so konnte die in Abbildung 3.3 gezeigte Makroaufnahme angefertigt werden.

## 4 Vermessung der optischen Charakteristiken der LED

Im vorangegangenen Kapitel 3 wird auf die Möglichkeiten der Ansteuerung der LEDs mittels eines Treibers, der relativ hohe Ströme liefern kann, eingegangen. Ebenfalls werden die LEDs und die eingesetzten Messmethoden, die optische Vermessung mit einer Fotodiode, einem Spektrometer und einer ULBRICHTkugel kurz vorgestellt.

In diesem Kapitel werden die LEDs mittels dieser Messmethoden optisch charakterisiert und die durchgeführten Versuche sowie ihre Ergebnisse vorgestellt.

### 4.1 Optische Vermessung mit einer Fotodiode

Bei diesem Versuch soll durch eine Steigerung des anliegenden Stroms an einer LED eine erhöhte Lichtausbeute nachgewiesen werden. Die gefundenen Werte sollen keine Absolutwerte sein, sondern relativen Charakter haben. Somit ist bei den Messungen das Verhältnis zwischen höheren Strömen und höherer Lichtausbeute von Bedeutung.

Mit einer Fotodiode wird das emittierte Licht einer Leuchtdiode gemessen. Dabei werden über auftreffende Photonen Elektronen-Loch-Paare erzeugt, woraus ein Stromfluss resultiert, der über einen Widerstand in Form eines Spannungsabfalls gemessen und z. B. direkt auf einem Oszilloskop dargestellt werden kann. Über eine optische Anordnung wird das Licht der LED kollimiert und auf einer Fotodiode abgebildet. Um zu vermeiden, dass Fremdlicht auf die Fotodiode fällt, wird während der Messungen das Labor abgedunkelt. Wie in Kapitel 3 erwähnt, wird mit verschiedenen Fotodioden experimentiert, jedoch zeigte sich, dass die verstärkten Fotodioden (die Verstärkung erfolgt mit einem Transimpedanzverstärker/rückgekoppelten Operationsverstärker; OPV) für die Messungen am geeignetsten erscheinen. Dies kann unter anderem damit begründet werden, dass durch die Verstärkung bereits schwache Signale detektiert werden können und das Stromrauschen ausreichend gering ist. Generell besteht bei den Fotodioden die



Schwierigkeit, dass die Anstiegs- und Abklingflanken der jeweiligen Fotodiode nicht genau von den Anstiegs- und Abklingflanken der LEDs getrennt werden können (es kann lediglich eine ungefähre Abschätzung anhand der Werte aus den Datenblättern erfolgen). Dadurch erhält man einen statistischen Fehler, welcher sich durch die durchgeführten Messungen fortsetzt. Des Weiteren muss an dieser Stelle auf eine Messungenauigkeit bezüglich der Erfassung der Werte hingewiesen werden, die je nach gewähltem Messbereich unterschiedlich ausfällt.

Aufgrund des kompakten Gehäuses und der praktischen Stromversorgung wird auf ein kommerzielles Produkt von THORLABS, einem verstärkten Fotodetektor mit der Bezeichnung PDA10A-EC, zurückgegriffen; es handelt sich bei der verbauten Fotodiode um eine Silizium Diode (Typ: FDS010 Si), die ihre spektrale Empfindlichkeit bei 200 bis 1200 nm aufweist und deren Maximum der Ansprechempfindlichkeit (engl.: Peak Response) bei einer Wellenlänge von 750 nm liegt (siehe spektrale Empfindlichkeitskurve der Fotodiode FDS010 Si im Anhang A.4). Die Ansprechzeit der Fotodiode wird im Datenblatt mit einem Wert  $< 1$  ns angegeben (sowohl für die Anstiegszeit als auch für die Abklingzeit), was jedoch in der Realität in Verbindung mit der gekoppelten Verstärkerstufe – mit der für dieses System eine Bandbreite von 150 MHz angegeben wird – nicht zu erreichen ist. Da die Anstiegszeit einer LED typischerweise über 1 ns liegt, wird von einer ausreichenden Geschwindigkeit der Fotodiode für die durchgeführten Versuche ausgegangen. Wird die LED mit einem ansteigenden Strom betrieben, sind bedingt durch Intensitätsveränderungen über mehrere Größenordnungen hinweg sogenannte Neutral-Dichte-Filter (ND-Filter) einzusetzen. Diese verhindern, dass die Fotodiode durch zu hohe Intensitäten in Sättigung geht und ein überproportionaler Stromfluss am Widerstand entsteht. Die Werte der ND-Filter müssen bei der anschließenden Auswertung berücksichtigt werden. Dabei sind auf den Filtern häufig Angaben bezüglich der Transmission (entspricht dem Prozentanteil des Lichtes, das durchgelassen wird) oder auch der Dichte in Prozent (was dem Logarithmus des Verlängerungsfaktors<sup>1</sup> entspricht) zu finden. Bei der Vermessung wird die LED über den Treiber (z. B. PicoLAS) und einen programmierbaren Pulsgenerator angesteuert. Der Pulsgenerator verfügt über frei programmierbare Ein- und Ausgänge, die über BNC-Anschlüsse und entsprechende Verbindungsleitungen abgegriffen werden können. Dabei wird einem bestimmten Ausgang, der wiederum zum Trigger-Eingang des Treibers führt, eine Pulsbreite und eine Frequenz zugeordnet. Über TTL-Signale bekommt der Treiber die entsprechenden

---

<sup>1</sup>Der Verlängerungsfaktor, ist ein Faktor mit dem die normale Belichtungszeit zu multiplizieren ist, um eine entsprechende unveränderte Lichtverteilung mit Filter zu erhalten.

Informationen, wie die LED gepulst werden soll. Zusätzlich wird das Signal des Pulsge-  
nerators auf einem Oszilloskop dargestellt. An einem weiteren Treiber-Anschluss kann  
die momentane Spannung abgegriffen werden, die ebenfalls am Oszilloskop dargestellt  
wird. Mithilfe der Herstellerangabe zum verwendeten Widerstand ( $0,05\,\Omega$ ), an dem die-  
se Spannung abfällt, wird über das OHmsche Gesetz der LED-Strom bestimmt. Zuletzt  
wird die Fotodiode mit dem Oszilloskop verbunden und nach Herstellervorgaben mit  
einer Impedanz von  $50\,\Omega$  abgeschlossen (terminiert). Entsprechend der in Abbildung 4.1  
gezeigten Anordnung werden die in Tabelle 3.1 angegebenen LEDs vermessen.

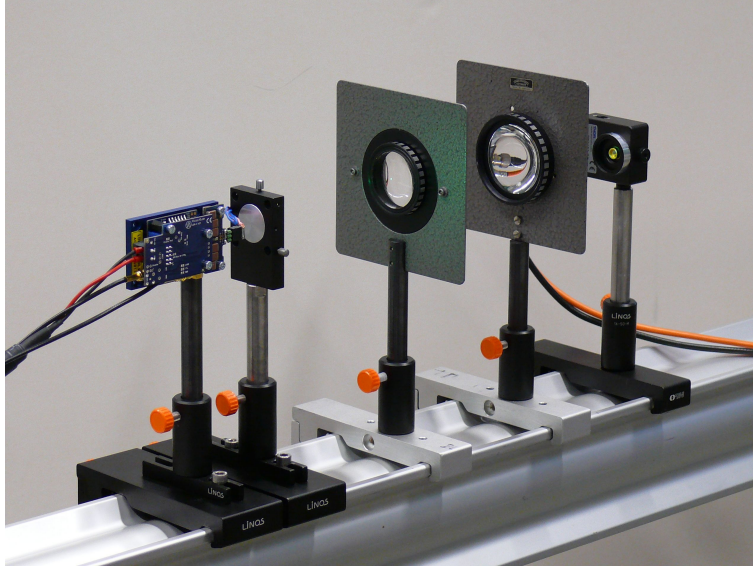


Abbildung 4.1: Messaufbau zur Aufnahme des emittierten Lichtsignals der LED  
mit dem verstärkten Fotodetektor PDA10A-EC; von links: Trei-  
ber (PicoLAS), LED (auf rundem Sockel montiert), Optiken zur  
Kollimierung, Fotodetektor

Die Ströme werden bei den Messungen schrittweise (die Abstände der Schritte werden  
mit ansteigendem Strom größer gewählt) bis auf den maximal möglichen Wert gesteigert.  
Der in Abhängigkeit von der zu vermessenden LED gelieferte Strom des Treibers  
LDP-V 50-100 kann Werte erreichen, die im Bereich von  $50\,\text{A}$  liegen. Bei den durch-  
geführten Versuchen wird eine konstante Frequenz von  $f = 1\,\text{kHz}$  gewählt, entsprechend  
einer Pulsbreite  $t_{an}$  von  $1\,\mu\text{s}$  ergibt sich mit

$$g = t_{an} f \quad (4.1)$$

ein Tastgrad  $g$  (Duty Cycle) von 1:1000.

Um eine gleichbleibende Charakteristik des optischen Strahlengangs und der bestrahlten Fotodiodenfläche (aktive Fläche:  $A = 0.8 \text{ mm}^2$ ) zu gewährleisten, wird bei den Experimenten darauf geachtet, den optischen Aufbau nach der Justierung nicht mehr zu verändern. Dies ist insbesondere während einer Messreihe mit derselben LED von Bedeutung. Beim Wechsel auf eine weitere zu vermessende LED wird der Aufbau jeweils leicht verändert, da die LEDs unterschiedliche Abstrahlwinkel aufweisen und dadurch der Strahlengang neu kollimiert werden muss.

Nach der Ermittlung der Messwerte mit der eben vorgestellten Vorgehensweise erfolgt eine Übertragung in ein Tabellenkalkulationsprogramm. Bei der Auswertung der Ergebnisse werden die erzeugten Spannungen der Fotodiode mit den entsprechend gewählten Dichte-Faktoren der ND-Filter umgerechnet. Des Weiteren erfolgt eine Normierung der Werte, um sie in einer möglichst aussagekräftigen Grafik darzustellen. In den Abbildungen 4.2 bis 4.5 sind die Messkurven von vier unterschiedlichen Leistungs-LEDs zu sehen; dabei wird die frei gewählte (engl.: arbitrary) anliegende Spannung an der Fotodiode über den Strom der LED aufgetragen.

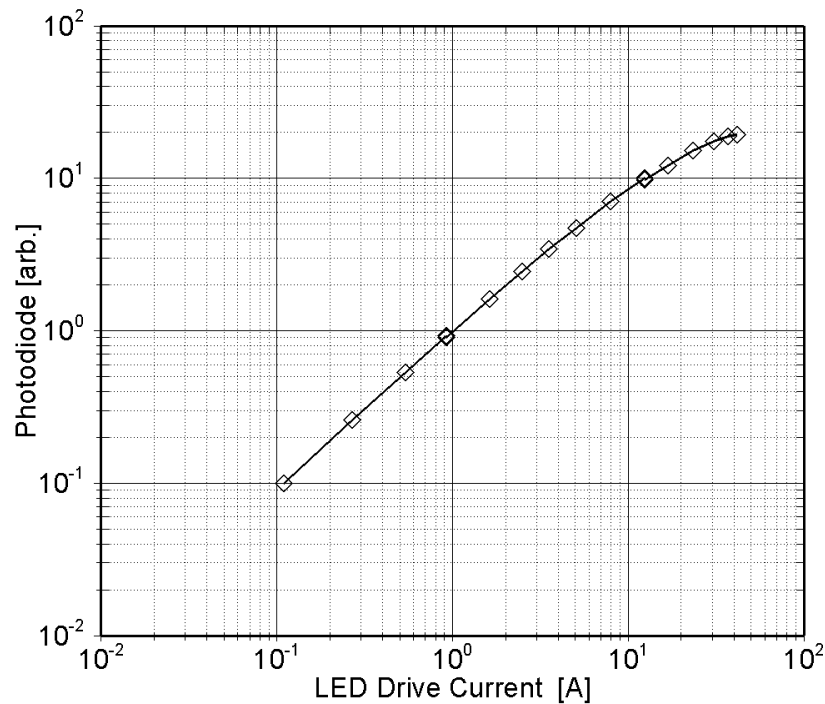


Abbildung 4.2: Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Luxeon LXHL-LD3C, red

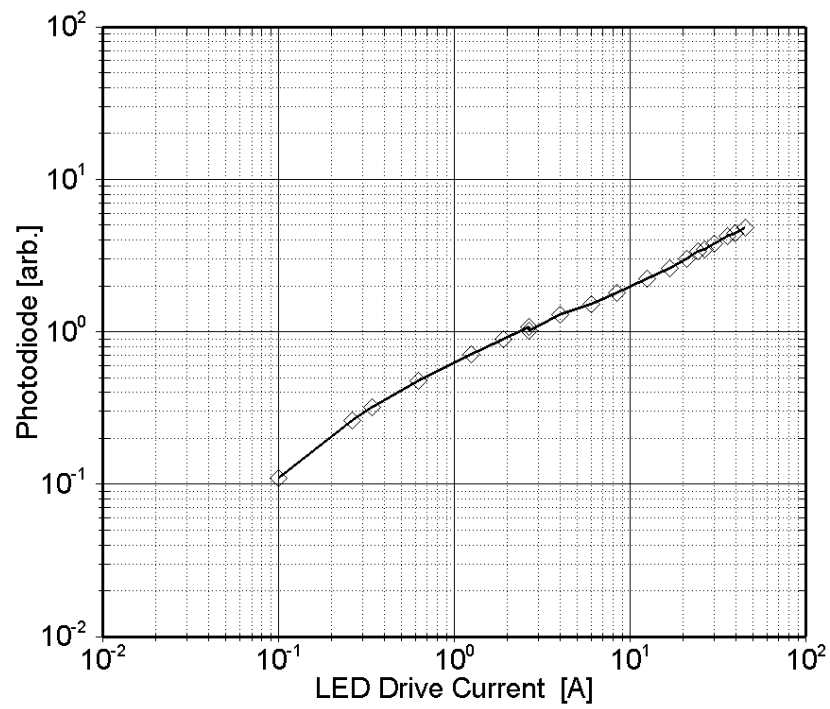


Abbildung 4.3: Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Luxeon LXHL-LM5C, green

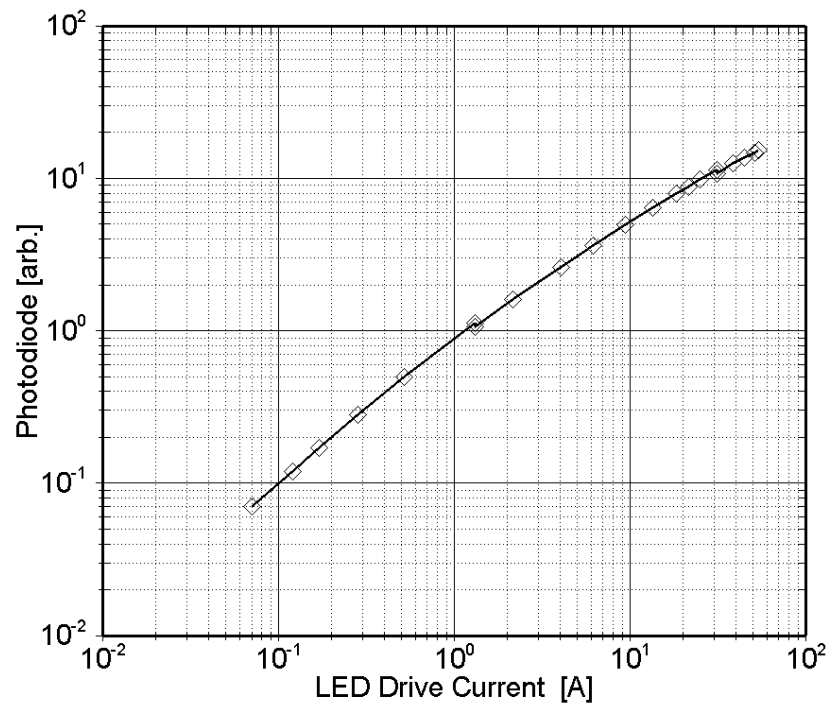


Abbildung 4.4: Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Phlatlight CBT-40, green

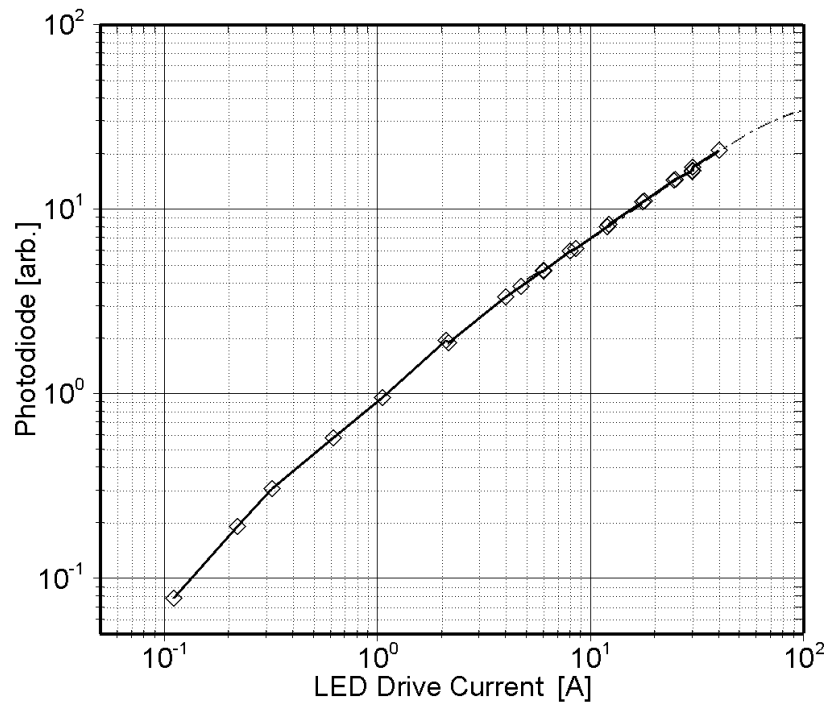


Abbildung 4.5: Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Phlatlight CBT-120, green

Anhand dieser logarithmisch aufgetragenen Kurven kann man deutlich erkennen, in welchen Bereichen (Dekaden) die Spannung mit dem Strom linear ansteigt und ab welchen Bereichen ein sublineares Verhalten eintritt. Die Stellen in den abgebildeten Messkurven, an denen die Unsicherheitsfaktoren (kleine Quadrate) leicht dunkler erscheinen, hat der Wechsel der ND-Filter stattgefunden. Diese geringen Verschiebungen resultieren u. a. von Reflexionen, die an den Filtern stattfinden. In Abbildung 4.3 der grünen Luxeon-LED ist zusätzlich eine kleine „Senke“ zu erkennen. Diese Unebenheit der dargestellten Kurve könnte ihre Ursache in der durch den ansteigenden Strom hervorgerufenen Verschiebung des Spektrums haben (siehe Kap. 4.2). Bedingt durch die spektrale Empfindlichkeit des Detektors könnte diese Verschiebung Auswirkungen auf die Steigung der dargestellten Messergebnisse haben. Eine Möglichkeit, diese Vermutung nachzuweisen, besteht darin, die Empfindlichkeit des Detektors mit in die Messergebnisse einfließen zu lassen (Korrektur des Spektrums). Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wird auf diese Korrektur verzichtet.

## 4.2 Vermessung mit einem Spektrometer

Wird an einer LED kontinuierlich der anliegende Strom erhöht, so kann bereits mit bloßem Auge eine geringe Verschiebung des emittierten Spektrums - tendenziell zu kürzeren Wellenlängen - erkannt werden.

Um diesen sogenannten Wellenlängen-Shift für die in Tabelle 3.1 aufgeführten LEDs nachzuweisen und zu charakterisieren, werden die LEDs mit einem Spektrometer vermessen. Hierfür steht ein Spektrometer des Typs Spectrograph SpectraPro275 des Herstellers Acton Research (ARC) zur Verfügung. Bei diesem System trifft das Licht auf einen variablen Spalt und wird dann über einen Ablenkspiegel und einen Hohlspiegel auf ein Gitter gerichtet. Das somit durch Beugung und Interferenz erzeugte Spektrum wird wiederum durch eine Anordnung von Spiegeln auf den Ausgang des Spektroskops gerichtet. Am Austrittsflansch befindet sich eine CCD-Kamera (PCO, Typ SensiCam QE), welche die ausgekoppelten Signale aufzeichnet. Die Kamera hat eine hohe Empfindlichkeit im sichtbaren Spektrum mit einem Maximum bei 500 nm (siehe Anhang A.7). Als Alternative zur CCD-Kamera kann auch eine Zeilenkamera verwendet werden. Abbildung 4.6 zeigt den Versuchsaufbau bei der Vermessung des Spektrums einer Leistungs-LED.



Abbildung 4.6: Messaufbau zur spektralen Vermessung von LEDs; links: Treiber mit LED und Optik, links hinten: grüner HeNe-Laser, Mitte: Strahlteiler, rechts: Spektrometer

Im Inneren des Spektrometers befindet sich eine Drehtrommel, auf der drei Gitter mit jeweils unterschiedlichen Dispersionen angebracht sind. Über einen Schrittmotor können diese Gitter an die entsprechenden Stellen verfahren werden. Für den hier beschriebenen Versuch wird ein Gitter mit 150 Linien/mm ausgewählt, das in zweiter Ordnung (entsprechend bei doppelter Wellenlänge) betrieben wird.

Um die spektrale Auflösung der Anordnung zu bestimmen, wird das Spektrometer mit einem roten und einem grünen Helium-Neon-Laser (HeNe-Laser) bekannter Wellenlängen kalibriert. Hierfür werden die beiden Laser-Strahlen über einen Strahlteiler (planparallele Quarzglasplatte) auf den Eintrittsspalt des Spektrometers gerichtet. Damit die Intensitäten der beiden auf den CCD-Chip auftreffenden Laser-Strahlen in etwa gleich sind, wird eine Kombination von unterschiedlichen ND-Filtern in den Strahlengang eingebracht. Für eine hinreichend genaue Bestimmung der Pixel, an denen sich die Peaks der beiden Laser befinden, wird eine Mittelung mit Hilfe der in der Kamerasoftware angezeigten Signalintensitäten durchgeführt, die über die Breite des Peaks unterschiedliche Werte aufweisen.

Der folgende Zusammenhang beschreibt, wie bei der Bestimmung der spektralen Auflösung [nm/px] vorgegangen wird:

Die Wellenlängen der beiden HeNe-Laser betragen in Luft:

$$\lambda_{HeNe,gruen} = 543,3650 \text{ nm und } \lambda_{HeNe,rot} = 632,8160 \text{ nm}$$

Die Auflösung des PCO Kamera-Sensors beträgt:

$$\text{Ortsauflösung} = 1376 \times 1040 \text{ px}$$

Werden beide in das Spektrometer eingekoppelten Laser aktiviert, so befinden sich die Peaks der Laser beispielsweise an folgenden Stellen des CCD-Sensors:

$$\lambda_{HeNe,gruen} = 1263 \text{ px und } \lambda_{HeNe,rot} = 90 \text{ px}$$

Aus der Differenz der Pixel der beiden Peaks erhält man

$$1263 \text{ px} - 90 \text{ px} = 1173 \text{ px.}$$

Aus der Differenz der Wellenlängen der beiden HeNe-Laser erhält man

$$632,8160 \text{ nm} - 543,3650 \text{ nm} = 89,451 \text{ nm}.$$

Werden nun die Wellenlängendifferenz und Pixeldifferenz zueinander ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich die spektrale Auflösung

$$89,451 \text{ nm}/1173 \text{ px} = 0,076 \text{ nm/px}.$$

Nach der Ermittlung der spektralen Auflösung wird in der Versuchsanordnung der rote HeNe-Laser durch eine Leistungs-LED ersetzt. Der grüne HeNe-Laser bleibt im System eingekoppelt und dient als Referenz (bei Vermessung der rot-orangen LED dient der rote HeNe-Laser als Referenz).

Bedingt durch die Oberflächenstruktur der LEDs ergeben sich störende Abbildungsartefakte am Eintritt des Spektrometers, die durch das Einbringen einer diffusen Streuscheibe (Mattscheibe einer Spiegelreflexkamera) in den Strahlengang größtenteils unterdrückt werden können. Eine ideale Unterdrückung der Abbildungsartefakte ist prinzipiell durch die Verwendung einer ULBRICKT-Kugel möglich, wird jedoch wegen der damit einhergehenden Reduktion des Lichtflusses am Austritt der Kugel und der damit deutlich geringeren Signalausbeute im Spektrometer nicht umgesetzt. Bei der Bestimmung der unterschiedlichen Spektren der LEDs wird zunächst ein Dunkelbild des Basis-signals (bei geschlossenem Kameraobjektiv) aufgezeichnet. Dieses wird später von den aufgezeichneten Spektrenmessungen abgezogen, um eine Absolutintensitätsmessung zu ermöglichen. Die anschließenden Aufnahmen zur Bestimmung des Wellenlängen-Shifts erfolgen bei einer Belichtungszeit von ca. 1 s bei unterschiedlichen Stromstärken. Es werden Aufnahmen im cw-Betrieb (continuous wave) bei 50 und 100 mA sowie im gepulsten Betrieb ( $f = 1 \text{ kHz}$ ) bei Stromstärken von 4 bis 55 A gemacht, abhängig von der zu charakterisierenden LED. Anschließend werden mit der Kamerasoftware mehrere Zeilen des jeweiligen Spektrums ausgewählt und das arithmetische Mittel gebildet, womit der Signal-Rausch-Abstand verbessert wird. Für die weitere Auswertung werden die Daten in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen und mit der spektralen Auflösung von 0,076 nm/px gewichtet. Die Abbildungen 4.7 bis 4.10 zeigen die grafische Auswertung der Messergebnisse. Die dargestellten verschobenen Spektren einer LED ergeben sich aus den unterschiedlichen Stromstärken und zeigen quantitativ den Wellenlängen-Shift. In Abbildung 4.7 ist zusätzlich das Spektrum des roten Lasers, in den Abbildungen 4.8 bis 4.10 das Spektrum des grünen Lasers zu sehen.



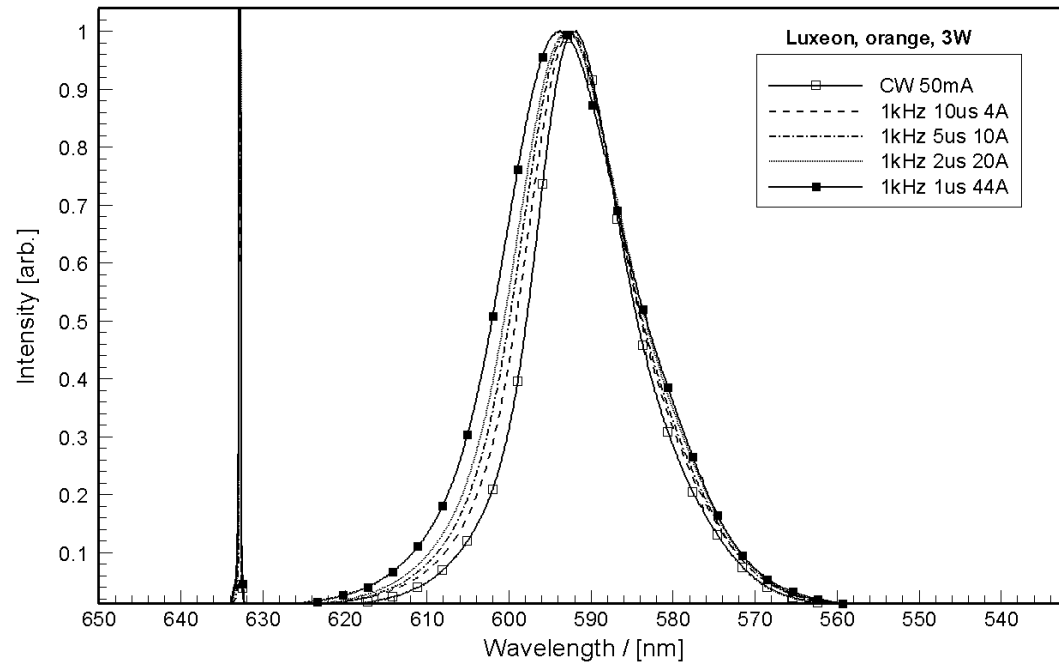


Abbildung 4.7: Spektren einer LED Luxeon III Star LXHL-LH3C, red-orange; bei Ansteuerung mit unterschiedlichen Strömen

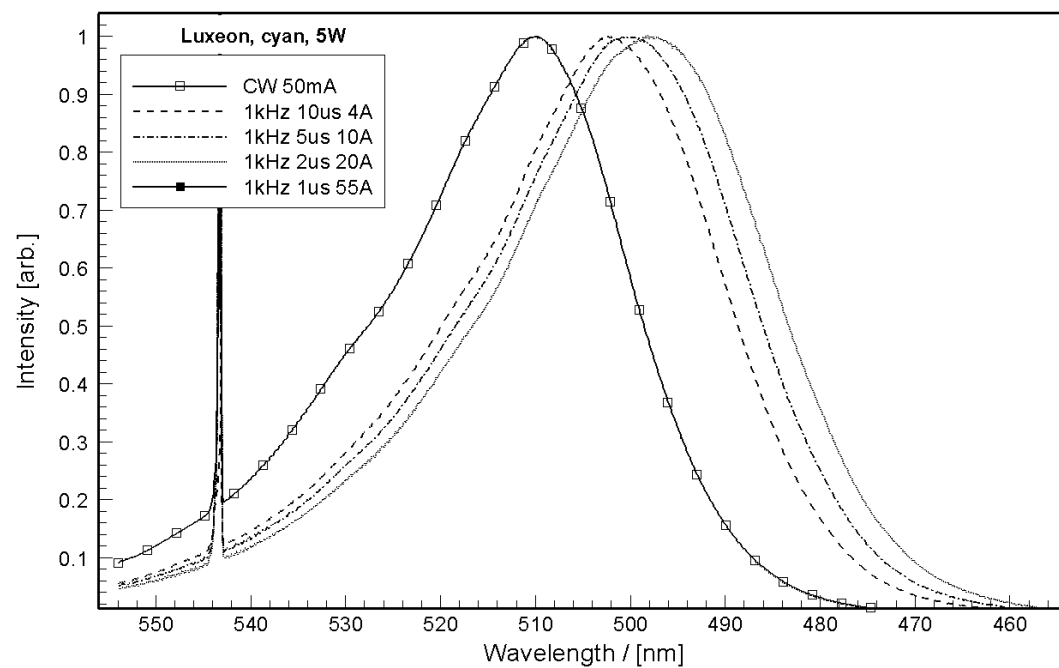


Abbildung 4.8: Spektren einer LED Luxeon V Star LXHL-LE5C, cyan; bei Ansteuerung mit unterschiedlichen Strömen

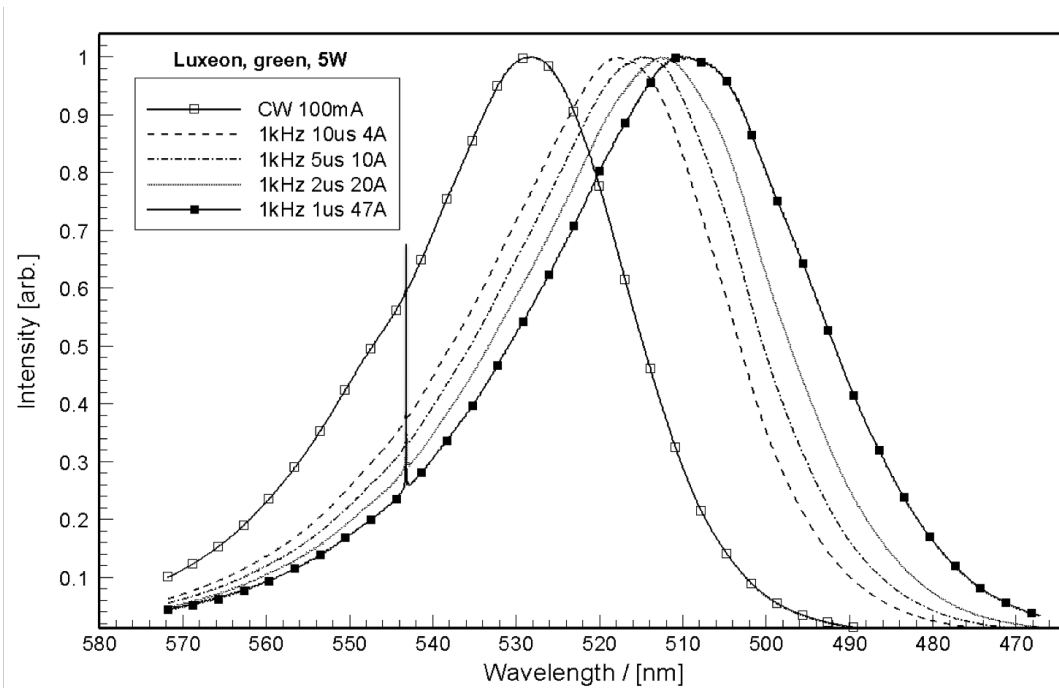


Abbildung 4.9: Spektren einer LED Luxeon V Star LXHL-LM5C, green; bei Ansteuerung mit unterschiedlichen Strömen

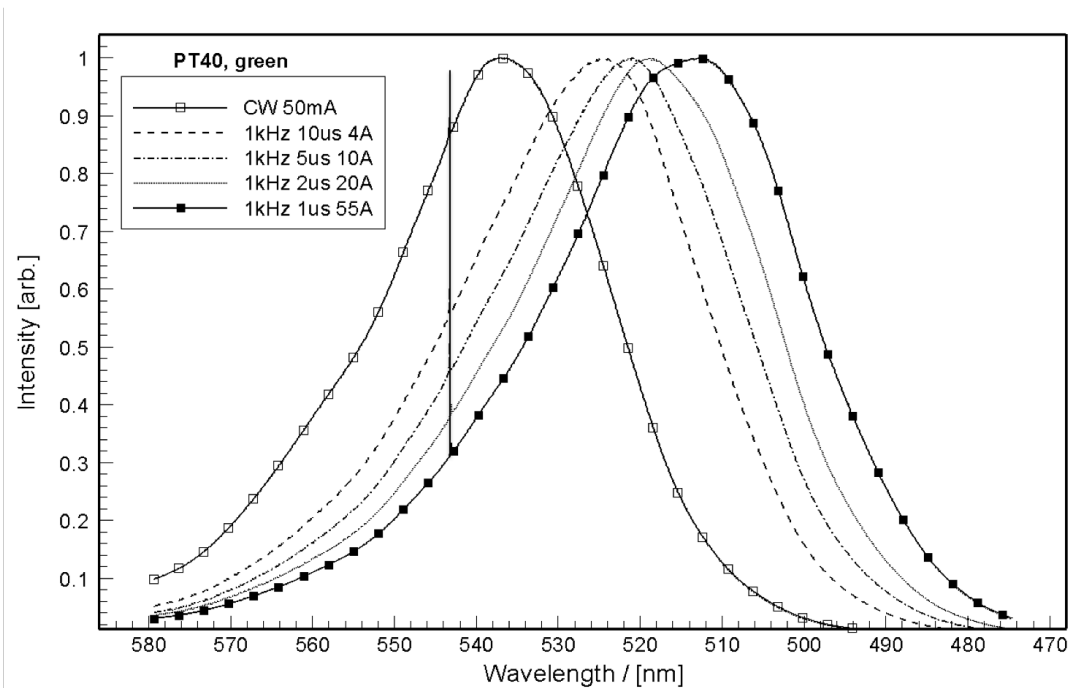


Abbildung 4.10: Spektren einer LED Phlatlight CBT-40, green; bei Ansteuerung mit unterschiedlichen Strömen

Die Normierung der Spektren erfolgt nur hinsichtlich der spektralen Auflösung, jedoch nicht für die spektrale Empfindlichkeit des Spektrometers (Abhängigkeit der Reflexion von der Wellenlänge). Des Weiteren muss die spektrale Empfindlichkeit der CCD-Kamera beachtet werden, die in die hier gezeigten Auswertungen nicht einfließt.

### 4.3 Vermessung mit einer Ulbrichtkugel

In Kapitel 4.1 wird bereits anhand einer kollimierten LED, deren Licht auf einen Fotodetektor trifft, eine relative gesteigerte Lichtausbeute nachgewiesen.

In diesem Kapitel werden zwei unterschiedliche Messmethoden zur Bestimmung des Lichtstroms mit einer ULBRICHTkugel kurz vorgestellt. Anschließend wird die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der relativen gesteigerten Lichtausbeute beschrieben, die unabhängig von der Abstrahlcharakteristik einer LED mit der ULBRICHTkugel gemessen wird.

Bei der optischen Vermessung der mit hohen Strömen gepulsten LEDs ist es insbesondere von Bedeutung, dass durch den Anstieg des LED-Stroms auch ein Anstieg des emittierten Lichtstroms nachgewiesen wird. Für die quantitative Bestimmung des Lichtstroms können unterschiedliche Verfahren ausgewählt werden. Wie in [12] beschrieben, kann zur Messung des Lichtstroms ein an der Detektoröffnung der ULBRICHTkugel angebrachtes Spektralradiometer verwendet werden. Dabei wird die gesamte spektrale Verteilung der jeweiligen LED gemessen. Über die CIE Normtabelle kann schließlich der Lichtstrom bzw. die Strahlungsleistung ermittelt werden.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung des Lichtstroms bietet das Fotometer (z. B. auf Basis eines Siliziumdetektors) in Kombination mit einem  $V(\lambda)$ -Filter (relativer spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des Auges, siehe Anhang A.3). Die Bestimmung des Lichtstroms erfolgt hierbei aus der Proportionalität des Lichtstroms der emittierenden LED zum gemessenen Ausgangsstrom des an der ULBRICHTkugel angebrachten Detektors.

Für eine Umrechnung der Strahlungsleistung  $\Phi_e(\lambda)$  in den Lichtstrom  $\Phi_v$  (die Gegenüberstellung der radiometrischen und fotometrischen Größen ist in Anhang A.1 zu sehen), muss die Funktion mit der Augenempfindlichkeitskurve  $V_\lambda$  gefaltet werden

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda. \quad (4.2)$$

Um eine Messung der relativen gesteigerten Lichtausbeute unabhängig von der Abstrahlcharakteristik der LED durchzuführen, wird in diesem Versuch eine ULBRICHTkugel zu-

sammen mit dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Fotodetektor verwendet. Bei der Messung mit einer ULBRICKTKugel wird das gesamte emittierte Licht einer LED über eine Eintrittsöffnung in die Kugel eingekoppelt. Innerhalb der Kugel wird es an der Innenwand mehrfach reflektiert und somit auf optischem Wege integriert. Durch die Verwendung einer speziellen, diffus reflektierenden Beschichtung (z. B.  $\text{BaSO}_4$ , Bariumsulfat) entsteht eine hochreflektierende Oberfläche mit einem Reflexionsgrad von  $R > 98\%$ . Die in der vorliegenden Arbeit verwendete ULBRICKTKugel ist optimiert für Wellenlängen von 300 bis 1800 nm. Die Kugel hat einen Innendurchmesser von  $d = 150$  mm und eine Eintrittsöffnung für die Lichtquelle von  $d = 40$  mm. An einer weiteren Öffnung wird der Fotodetektor angebracht. Zur Vermeidung der direkten Bestrahlung des Fotodetektors (es soll nur von der Innenwand reflektiertes Licht auf die Fotodiode treffen), wird vor dem Detektor eine Blende angebracht. Es werden die in Tabelle 3.1 gezeigten LEDs vermessen. Der mit dem PicoLAS-Treiber erzeugte Strom wird wie in den vorangegangenen Versuchen schrittweise (die Abstände der Schritte werden mit ansteigendem Strom größer gewählt) erhöht. Dabei werden die LEDs bei einer Frequenz von 1 kHz und einer Pulsbreite von  $1\ \mu\text{s}$  vermessen. In Abbildung 4.11 ist die ULBRICKTKugel mit dem Fotodetektor und dem Treiber von PicoLAS zu sehen. Die LED befindet sich auf einer Vorrichtung montiert an der Eintrittsöffnung der Kugel.

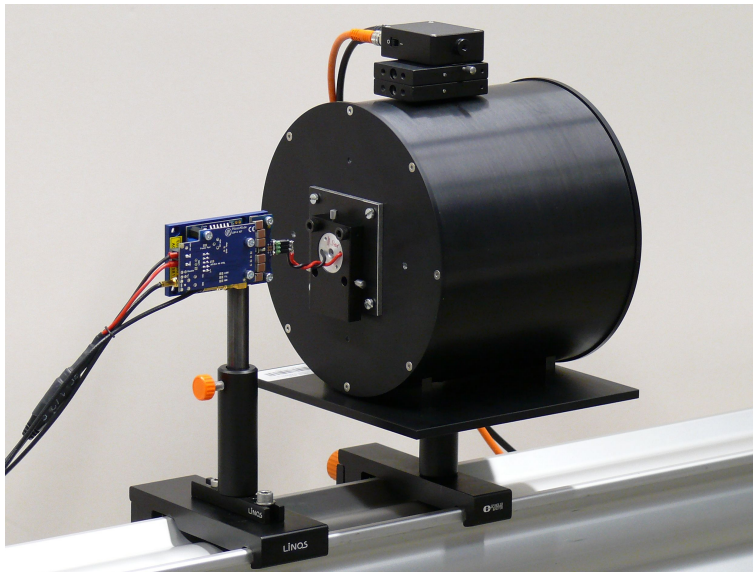


Abbildung 4.11: ULBRICKTKugel im Messbetrieb mit dem Treiber von PicoLAS (links) und dem Fotodetektor (oben)

Die Detektorempfindlichkeit muss beim Vergleich unterschiedlicher LEDs korrigiert werden. Aus diesem Grund werden in den Versuchen LEDs mit einem ähnlich emittierenden

Spektrum optisch vermessen. Für den Versuch werden die beiden LEDs Phlatlight CBT-40, green und CBT-120, green und die Luxeon LXHL-LM5C, green in der ULBRICHT-kugel vermessen. Abbildung 4.12 zeigt die Messkurven der drei grünen LEDs.

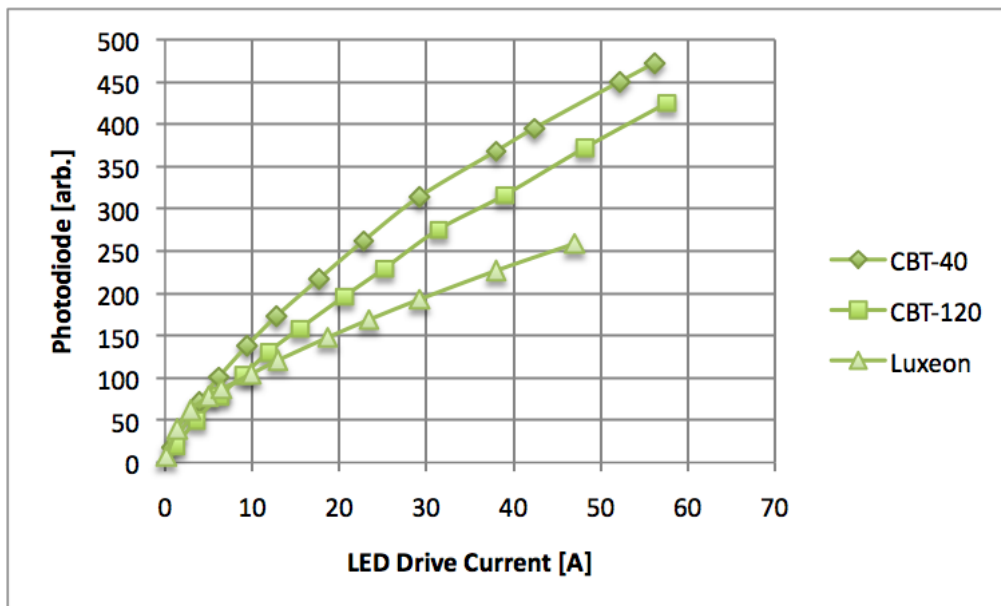


Abbildung 4.12: Optische Vermessung von grünen LEDs unterschiedlichen Typs in der ULBRICHTkugel

Die Grafik liefert Aussagen über die relative Lichtausbeute bei unterschiedlichen gepulsten Strömen. Während die LED Luxeon bereits bei relativ kleinen Strömen von ca. 5 A tendenzielle Sättigungserscheinungen zeigt und somit mehr Wärme als Licht produziert, ist dies bei den beiden LEDs Phlatlight nicht der Fall. Bei höheren Strömen sind die Phlatlight-LEDs deutlich effizienter. Dies liegt unter anderem an dem verwendeten Treiber, der keine ausreichenden Ströme für eine Übertaktung liefern kann. Ein Vergleich müsste bei gleichen Übertaktungsverhältnissen stattfinden, um Aussagen über die Effizienz der LEDs Luxeon und Phlatlight zu machen. Des Weiteren scheint es, dass die PT-40 effizienter als die PT-120 arbeitet. Über mögliche Ursachen kann spekuliert werden.

# 5 Anwendung von LEDs in der Strömungsmesstechnik

In Kapitel 4 wird gezeigt, dass durch die Ansteuerung von LEDs mit hohen gepulsten Strömen eine gesteigerte Lichtausbeute erreicht werden kann.

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, dass kurze Lichtpulse von LEDs über ausreichend Potential verfügen, laserbasierte Lichtquellen in der Strömungsmesstechnik zu ersetzen. Die Umsetzbarkeit wird anhand eines PIV-Experiments (Particle Image Velocimetry), sowie in einer schnellen Folge von Schattenwurf-Abbildungen mittels Kerosin-Spray in einer Druck-Brennkammer demonstriert.

Des Weiteren wird auf drei Verfahren (Kap. 5.2) eingegangen, bei denen der Einsatz von LEDs als Beleuchtungsquelle möglich erscheint.

## 5.1 Strömungsmesstechnische Verfahren und Versuche mit LED als Beleuchtungsquelle

### 5.1.1 Particle Image Velocimetry (PIV)

Die Particle Image Velocimetry, ein flächig auflösendes Strömungsmessverfahren, kam in den letzten Jahren zunehmend für Strömungsuntersuchungen in der Grundlagen- und angewandten Forschung zum Einsatz. Dabei wird das Streulicht kleiner Partikel abbildend erfasst, welche die Strömung mit sich führt und deren Beleuchtung durch einen gepulsten Laser oder andere gepulste Lichtquellen in einer Ebene erfolgt. Hierbei nimmt eine Digitalkamera in der Regel zwei Aufnahmen in zeitlich kurzer Abfolge vor. Mittels statistischer Verfahren wird der Ortsversatz der Partikel auf der Bildebene (CCD-Sensor) lokal bestimmt und dient unter Berücksichtigung des Pulsabstands und des geometrischen Vergrößerungsfaktors als Maß für die lokale Strömungsgeschwindigkeit. Durch die statistische Auswertung des örtlichen Partikelversatzes über den gesamten Bildbereich kann so ein Abbild des aktuellen Strömungsfelds erstellt werden [13, 14].

Abbildung 5.1 zeigt vereinfacht das PIV-Prinzip anhand der Partikel-dotierten Strömung (in Pfeilrichtung), die mit einem Laserlichtschnitt durchsetzt wird und zu zwei Zeitpunkten, erste Belichtung  $t_0$  und zweite Belichtung  $t_0 + \Delta t$ , aufgenommen wird.

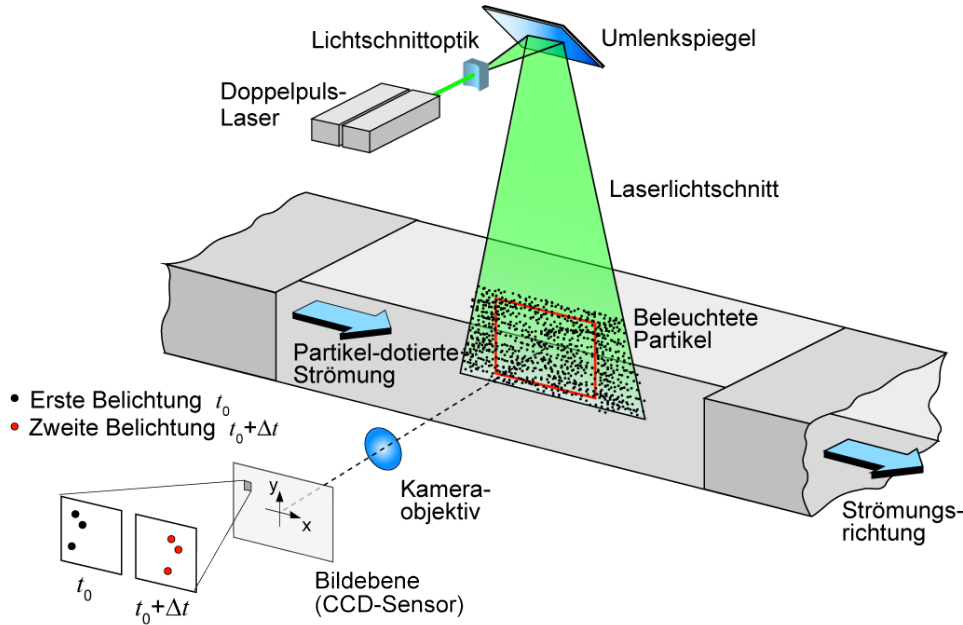


Abbildung 5.1: Prinzipskizze der PIV; aus [13] S. 4

Um die relevante Strömungsebene auszuleuchten, kommen bei der PIV vornehmlich kostenintensive Pulslasersysteme zum Einsatz, deren Laserstrahl in einem Lichtschnitt aufgespannt wird; dies erfolgt mittels einer Zylinderlinsenoptik (siehe Abb. 5.2). Gütegeschaltete sowie blitzlampengepumpte Festkörperlaser auf Basis von Nd:YAG-Material (Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat) finden hierbei die größte Verbreitung. Aktuelle PIV-Lasersysteme verfügen generell über zwei getrennte Resonatoren. Deren Licht wird zunächst in einem gemeinsamen Strahl vereinigt; anschließend erfolgt in einem Frequenzverdopplungskristall (z. B. KDP-Kristall; Kaliumdihydrogenphosphat) eine Konversion von der fundamentalen Wellenlänge von 1064 nm (infrarot) auf 532 nm (grün). Aufgrund der Baulänge des Resonators liegt die Pulslänge in einem Bereich von 5 bis 10 ns und ist somit mehrere Größenordnungen kürzer, als für eine Unterdrückung der Bewegungsunschärfe erforderlich ist. Seit einigen Jahren sind ebenfalls spezielle gepulste Hochgeschwindigkeitslaser mit Wiederholraten von mehreren kHz verfügbar, die zusammen mit geeigneten CMOS<sup>1</sup>-Hochgeschwindigkeitskameras für die kontinuierliche

<sup>1</sup>Complementary Metal Oxide Semiconductor

Erfassung des sich zeitlich ändernden Strömungsfeldes eingesetzt werden. Wegen der Größe der Lasersysteme, ihrer komplexen Versorgung (Hochspannung, Kühlung, etc.) sowie ihrer generellen Sensitivität gegenüber externen Einflussfaktoren ist deren zuverlässiger Einsatz an schwer zugänglichen Messobjekten oder als autonom betriebene Systeme zur unbetreuten Datenerfassung nur mit Einschränkungen möglich. Auch die konstante Wiederholungsrate, mit welcher Laser zu betreiben sind, um optimale Strahleigenschaften erzielen zu können, wirkt als einschränkend.

Diese aufgezeigten Nachteile, die der Einsatz eines Pulslasersystems in der PIV mit sich bringt, sollen durch die Verwendung von gepulsten Leistungs-LEDs vermieden werden. In der Literatur werden verschiedene Ansätze beschrieben, LEDs als Lichtquelle für die Strömungsfeldmessung zu nutzen, vorrangig Verfahren bei denen gepulst betriebene LEDs zur Ausleuchtung des Hellfeldes genutzt werden, um z. B. Bläschen [15] oder Partikel [16] als Schatten sichtbar zu machen. In ähnlicher Weise können fluoreszierende Partikel in mikroskopischen Strömungen durch gepulst betriebene LEDs angeregt werden [17]. Gemeinsamkeit der bisherigen bekannten LED-PIV Verfahren ist eine volumetrische Ausleuchtung des Strömungsfeldes. Eine Verwendung von LEDs zur Erzeugung eines Lichtschnitts in einer klassischen Anordnung, wie in Abbildung 5.1 gezeigt, ist bisher nicht bekannt.

Der in diesem Kapitel beschriebene apparative Aufbau ist das Ergebnis mehrerer Vorversuche LEDs für Lichtschnitt-basiertes PIV zu nutzen. Im Gegensatz zum kollimierten Strahl eines Lasers ist die Abstrahlung einer LED über einen größeren Raumwinkel verteilt und lässt sich nicht ohne weiteres in ein dünnes Lichtband bündeln. Unter Verwendung abbildender Optik lässt sich bestenfalls der Flächenstrahler in das zu beobachtende Volumen abbilden, womit ein kleiner Bereich mit intensivem Licht ausgeleuchtet und so für die PIV nutzbar wird. Dieser Ansatz wird für PIV Messungen sowohl in Wasser als auch in Luft genutzt [18].

Für die Erzeugung eines Lichtbands wird eine Wandlungsoptik in Form eines speziellen Lichtleiterbündels eingesetzt. Dieses Lichtleiterbündel zeichnet sich dadurch aus, dass die Fasern auf der Eintrittsseite rund angeordnet sind, während sie auf der Austrittsseite entlang einer Linie angeordnet sind (siehe Abb. 5.2). Diese Optiken finden häufige Anwendung in der industriellen Bildverarbeitung als sogenannte Linienbeleuchtungsquelle. Das Licht der LED wird hierbei in das runde Ende eingekoppelt und in Form einer Linie emittiert. Diese Linie kann durch die Hinzunahme einer kurzbrennweitigen Zylinderlinse ( $f = 25 \text{ mm}$ ) zur Erzeugung eines Lichtschnitts verwendet werden.



Ein nicht unerheblicher Nachteil der Lichtleiter-basierenden Kollimierung des LED Lichtes ist, dass ein signifikanter Teil des verfügbaren LED Lichts bei der Wandlung verloren geht. Ursächlich ist die begrenzte numerischen Apertur  $NA^2$  des Lichtleiters (typ. 0.4 bis 0.55) im Vergleich zur relativ großen Apertur der LED (typ.  $> 1.0$ ; siehe z. B. Abstrahlcharakteristik der grünen CBT-40 und CBT-120 in Abb. 2.8). In den Lichtleiter kann nur Licht innerhalb des Akzeptanzwinkels entsprechend der Apertur eingekoppelt werden. Abbildung 5.2 zeigt die Prinzipskizze der PIV auf Basis von gepulsten LEDs unter Verwendung eines Linien formenden Lichtleiterbündels.

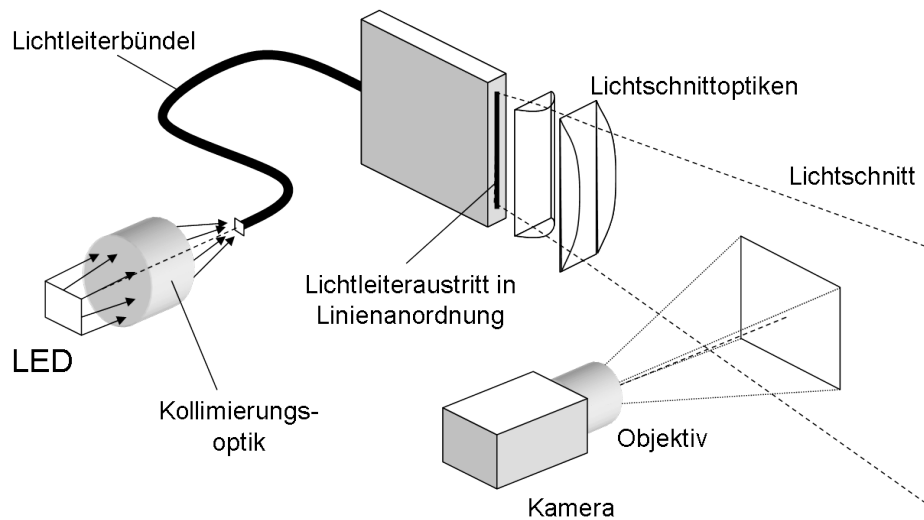


Abbildung 5.2: Prinzipskizze der PIV auf Basis von gepulsten LEDs; aus [18] S. 3

Im Rahmen eines einfachen Versuchsaufbaus wird das in Abbildung 5.2 gezeigte Messprinzip demonstriert. Hierzu wird die Strömung um eine rotierende Schiffsschraube (Modellbau) in einem kleinen Wasserbecken visualisiert. Der hierfür erzeugte Lichtschnitt hat eine Taillendicke von ca. 1 mm mit einem Arbeitsabstand von ca. 50 mm. Zur Sichtbarmachung der Strömung wird das Wasser mit silberbeschichteten Glasparkeln, von ca.  $10\,\mu\text{m}$  Durchmesser dotiert. Als Beleuchtungsquelle dient eine gepulste LED Phlatlight CBT-120, green. Die LED wird zunächst mit dem PicoLAS Treiber LDP-V 50-100 betrieben und später aufgrund von Überhitzung durch den Treiber des DLR ersetzt. Für die Aufzeichnung der Bilder wird eine CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera des Typs Photron APX-RS mit einem Objektiv Nikon Nikkor MF ( $f = 55\text{ mm}$ ; Blende:  $f/2.8$ ) verwendet, die zusammen mit der LED auf eine Pulsdauer von  $20\,\mu\text{s}$  (bei 16 A, Treiber

<sup>2</sup> $NA = n \sin \alpha$ ; mit Brechungsindex  $n$ ; Akzeptanzwinkel  $\alpha$

DLR) und  $10\text{ }\mu\text{s}$  (bei 40 A, Treiber PicoLAS) getriggert wird. Die Bildrate der Kamera wird auf 1.5 kHz gestellt. Damit ist es möglich, die Bildrate in etwa der Strömung anzupassen. Die Aufzeichnung erfolgt bei einer Auflösung von 1024 x 1024 px. Abbildung 5.3 und 5.4 zeigen den Versuchsaufbau für PIV auf Basis von gepulsten Leistungs-LEDs und eine Nahaufnahme der Lichtschnittoptik und des Wasserbeckens.

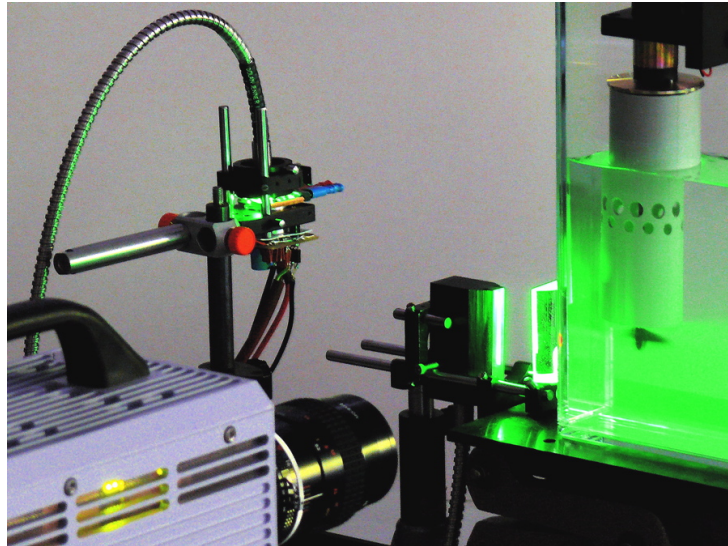


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau für PIV auf Basis von gepulsten Leistungs-LEDs; von links: Hochgeschwindigkeitskamera, LED mit Lichtwellenleiter, Lichtschnittoptik, Wasserbecken mit Schiffsschraube

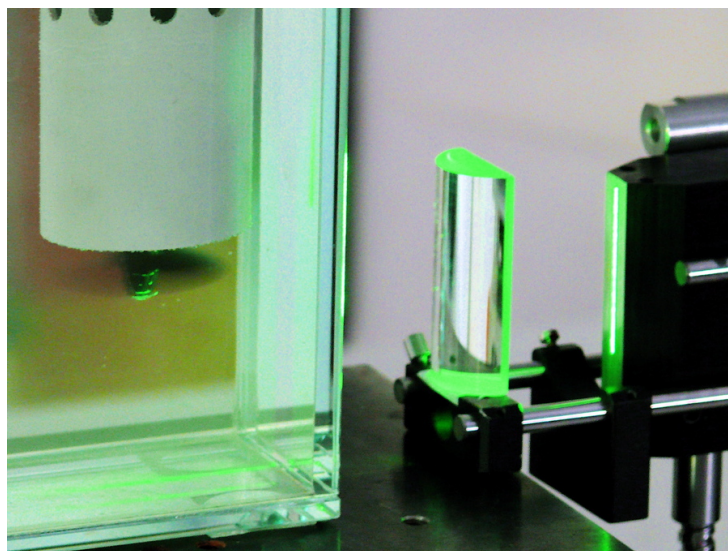


Abbildung 5.4: Nahaufnahme der Lichtschnittoptik und des Lichtleiterbündels mit Linienaustritt (rechts) und Wasserbecken mit rotierender Schiffsschraube (links)

Abbildung 5.5 zeigt ein PIV Einzelbild aus einer kontinuierlichen Serie, die mit diesem Aufbau aufgezeichnet werden konnte. Bis zu 1000 Bilder werden in verschiedenen Durchgängen aufgezeichnet, von denen einige exemplarisch ausgewertet werden.

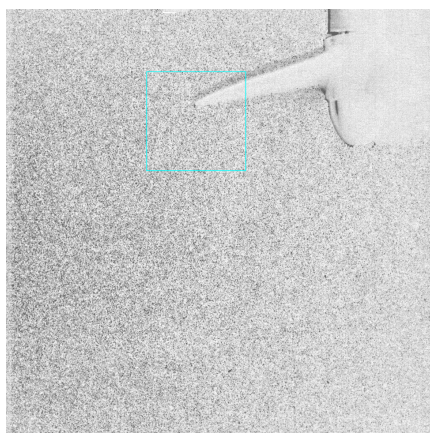


Abbildung 5.5: Kontrastverstärktes Negativ eines PIV-Einzelbildes; der hier abgebildete Bereich beträgt ca.  $50 \times 50 \text{ mm}^2$

Das Abfrageraster der PIV beträgt  $0.42 \times 0.42 \text{ mm}^2$  ( $8 \times 8 \text{ px}$ ). Der in Abbildung 5.6 gezeigte Bildausschnitt beträgt ca.  $12 \times 12 \text{ mm}^2$ , bei einem Vergrößerungsmaßstab von  $m = 19.1034 \text{ px/mm}$ . Für eine bessere Abbildung wird hier das Negativ des kontrastverstärkten Bildes gezeigt. Die Kontrastverstärkung beinhaltet im Wesentlichen die Subtraktion der Hintergrundintensität, ermittelt aus einer Serie von 100 Bildern, gefolgt von einer Intensitätserhöhung.



Abbildung 5.6: Kontrastverstärktes Negativ eines PIV-Einzelbildes, Vergrößerung aus Abb. 5.5; mit ca.  $12 \text{ mm}$  Kantenlänge

Abbildung 5.7 und 5.8 zeigen die ausgewerteten PIV Datensätze. Hierbei wird die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit durch die schwarzen Vektoren gekennzeichnet. Die hinterlegte Farbverteilung visualisiert die orts aufgelöste Wirbelstärke (engl.: vorticity) und macht auf diese Weise einzelne Wirbelstrukturen sichtbar, deren Bewegung in der zeitlichen Abfolge gut zu erkennen ist. Aufgrund der hohen Partikeldichte kann für die PIV Auswertung ein lokaler Abfragebereich von  $24 \times 24$  px realisiert werden, über den die mittlere Partikelverschiebung per iterativer Kreuzkorrelation bestimmt wird. Dies entspricht einer örtlichen Mittlung von  $1.26 \times 1.26 \text{ mm}^2$ . Hierbei ist zu beachten, dass die endliche Dicke des Lichtschnitts in einer ähnlichen Größenordnung ist und daher noch kleinere Abfragefenster nicht sinnvoll sind, um drei-dimensionale turbulente Strömung noch genauer aufzulösen. Abbildung 5.7 zeigt einen ausgewerteten PIV Datensatz, der aus den Bildserien gewonnen wird.

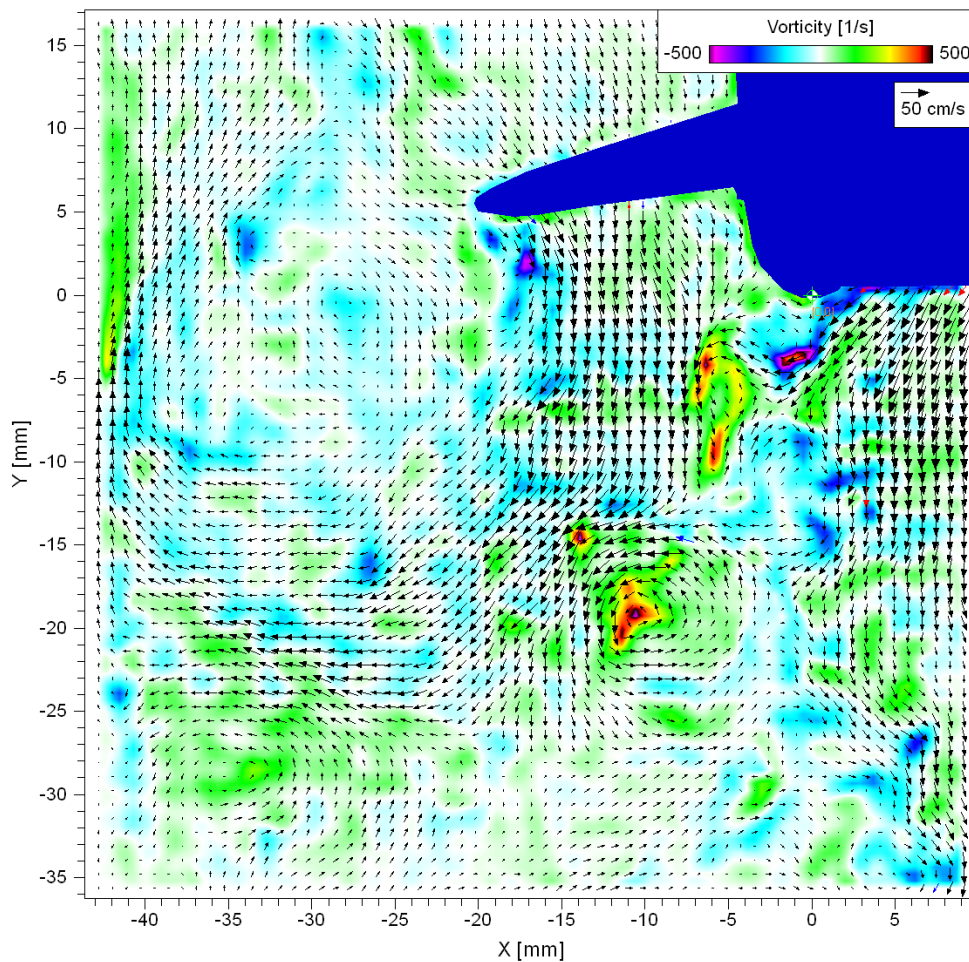


Abbildung 5.7: Ausgewerteter PIV Datensatz



Abbildung 5.8 zeigt eine Abfolge aus mehreren aufeinander folgenden PIV Datensätzen in denen die inkrementalen Veränderungen des turbulenten Strömungsfeldes gut erkennbar sind.

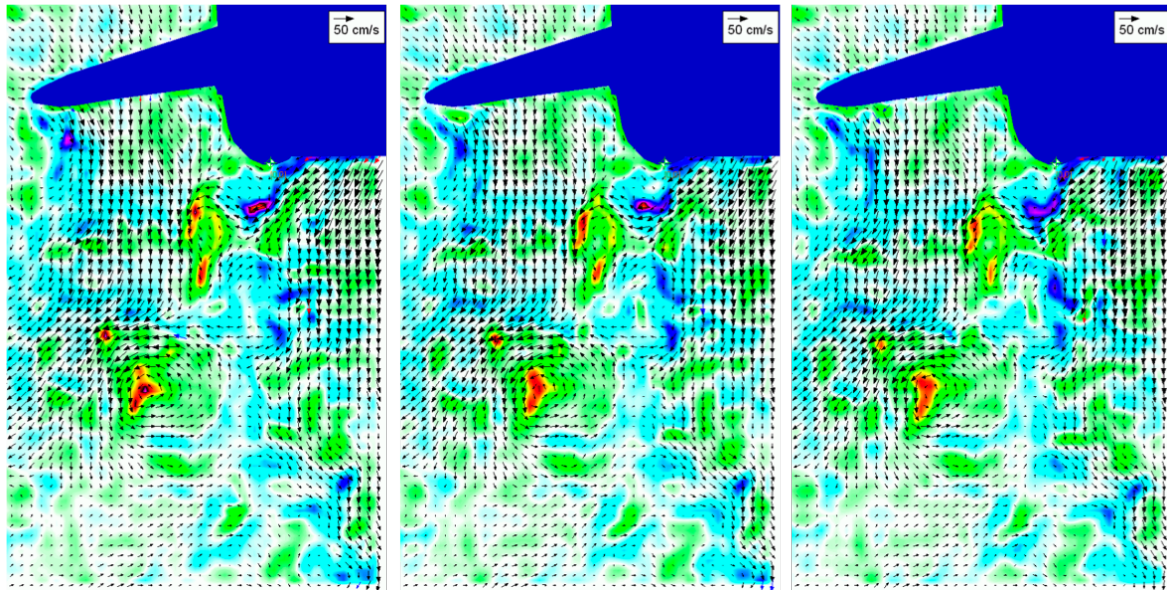


Abbildung 5.8: Abfolge aus mehreren aufeinander folgenden PIV Datensätze

### 5.1.2 Schattenwurfverfahren

Das Schattenwurfverfahren (engl.: Shadowgraphy) beruht auf dem physikalischen Effekt der Konzentration und Dekonzentration von Licht-Strahlen an Objekten (Abbildung der Schattenebene) [19]. Dabei wird durch einen Kollimator ein paralleles Strahlenbündel erzeugt und der Schattenwurf des zu vermessenden Objekts auf einen Lichtsensor (z. B. CCD-Kamera) projiziert. Abbildung 5.9 zeigt die Prinzipskizze des Schattenwurfverfahrens.

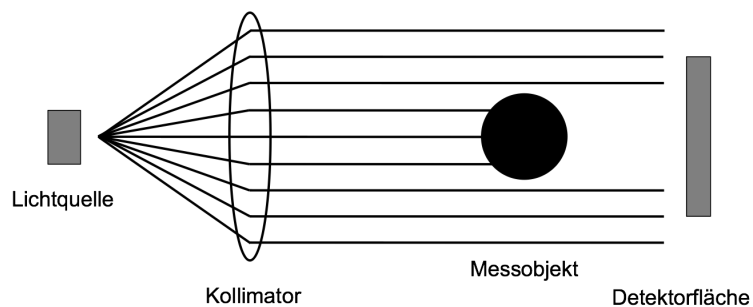


Abbildung 5.9: Prinzipskizze des Schattenwurfverfahrens; aus [20]

Die Hintergrundbeleuchtung kann u. a. mit einem gepulsten Diodenlaser oder Industrie-Stroboskop erfolgen. Aus den Positionen der Hell-Dunkelübergänge und der Geometrie des Aufbaus kann auf die Größe und Form des zu vermessenden Objekts geschlossen werden. Dabei wird durch die Tiefenschärfe des eingesetzten Objektivs der zu vermessende Bereich bestimmt, der fokussiert abgebildet werden soll. Mit dem Schattenwurfverfahren können u. a. kleine Partikel oder Tröpfchen sichtbar gemacht werden. Partikel oder Tröpfchen die außerhalb des Bereichs der Tiefenschärfe liegen, nehmen Einfluss auf die Intensität der Aufnahmen.

Um die LEDs bezüglich der Eignung für das Schattenwurfverfahren zu überprüfen, werden am Hochdruck-Verbrennungsprüfstand EDS (Ein-Düsen-Sektor) Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der relativ platzsparenden Versuchsanordnung können die Messungen parallel zu anderen Versuchen durchgeführt werden, in diesem Fall Phasen-Doppler Messungen zur Tropfgrößen- und Geschwindigkeitsverteilung des Kerosinsprays. Der EDS kann mit unterschiedlichen Flugtriebwerks-Brennern im Rahmen von Entwicklungsvorhaben betrieben werden, um z. B. deren Betriebseigenschaften bei unterschiedlichen Bedingungen detailliert mit optischer Messtechnik zu untersuchen. Zum Zeitpunkt dieser Diplomarbeit wird ein Brenner untersucht, der in etwa die Größenordnung eines Brenners für Hubschrauber hat. Um die Ergebnisse auf die Realität übertragen zu können, werden die Brenner unter realistischen Betriebsbedingungen betrieben. Abbildung 5.10 zeigt die Prinzipskizze des Schattenwurfverfahrens anhand einer Brennkammer.

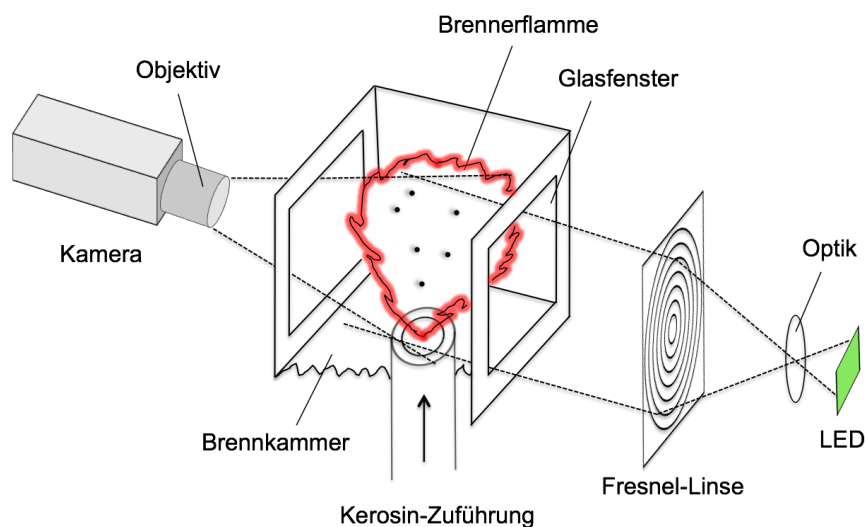


Abbildung 5.10: Prinzipskizze des Schattenwurfverfahrens anhand einer Brennkammer

Der EDS ist ein Hochdruck-Verbrennungsprüfstand (bis 20 bar), an dem unter realistischen Betriebsbedingungen (Lufteintrittstemperatur bis 850 K) Untersuchungen zur reagierenden 2-Phasen-Strömung von Flugtriebwerks-Brennern durchgeführt werden können. Abbildung 5.11 zeigt die schematische Darstellung des EDS, an dem mit einer gepulsten LED als Lichtquelle Untersuchungen durchgeführt werden.

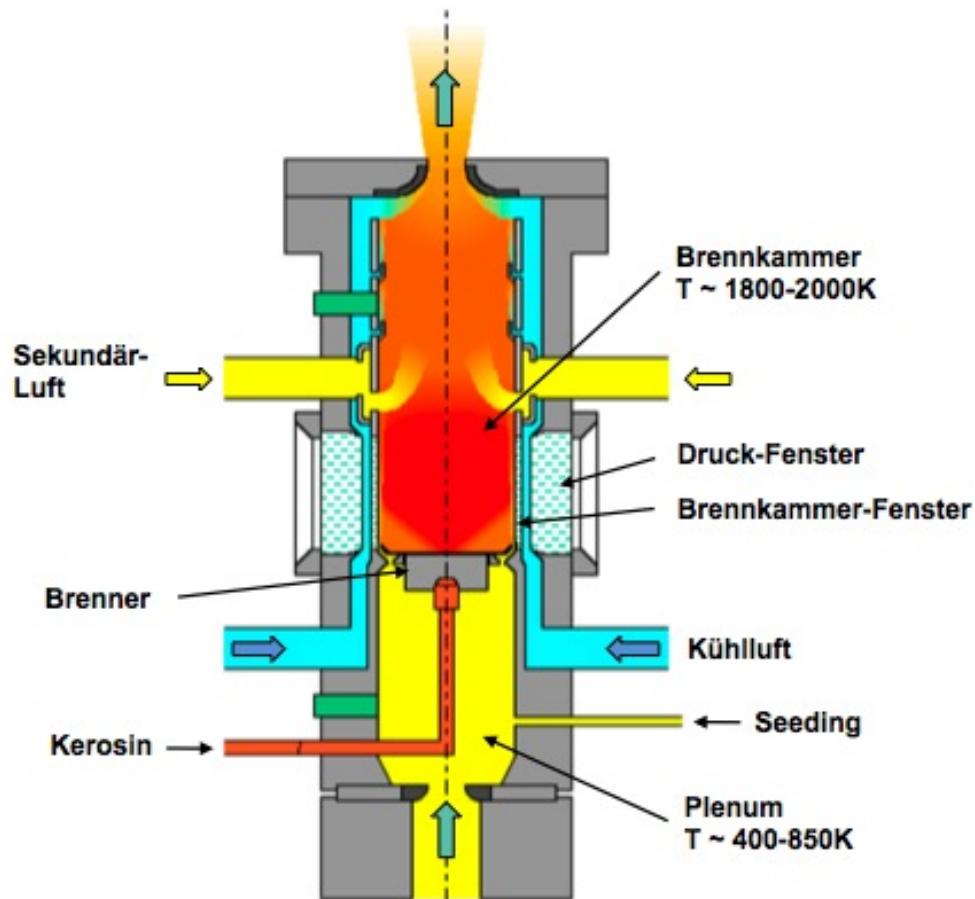


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung des Ein-Düsen-Sektors (EDS) des DLR zur Untersuchung von Brennern für Flugtriebwerke; aus [21] S. 2

Folgende Betriebsbedingungen sind am Prüfstand gegeben:

Druck: 4 bar; Druckverlust (Druckdifferenz die u. a. durch Wandreibung entsteht): 3%;  
AFR (Air Fuel Ratio; Verhältnis Massenluft zu Kraftstoff): 20; Temperatur: 550 K

Die für den Aufbau des Versuchs erforderlichen Komponenten werden entsprechend Abbildung 5.10 angeordnet. Über die in den Seitenwänden des Brenners eingelassenen Glas-

fenster wird der optische Zugang ermöglicht. Wie in Abbildung 5.11 zu sehen, handelt es sich dabei um doppelwandige Fenster, zwischen denen Kühlluft strömt. Es befinden sich insgesamt drei Fenster im Brenner, wobei für den hier vorgestellten Versuch die beiden gegenüberliegenden Fenster genutzt werden.

Als Beleuchtungsquelle wird die LED Phlatlight CBT-120 verwendet, die mit dem Laserdiodentreiber von PicoLas angesteuert wird. Um die gewünschte Helligkeit zu erreichen, reicht es in dieser Konfiguration aus, die LED mit einem relativ geringen Strom von 5 A zu betreiben. Für die Aufzeichnung der Bilder wird eine CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera des Typs Photron APX-RS mit einem Objektiv Nikon ( $f = 110$  mm; Blende:  $f/11$ ) verwendet, die zusammen mit der LED auf eine Pulsdauer von  $10\text{ }\mu\text{s}$  getriggert wird. Ein Interferenzfilter für 532 nm und 10 nm Halbwertsbreite wird für die Unterdrückung des intensiven Flammenleuchtens eingesetzt, um die spektrale Empfindlichkeit der Kamera auf das grüne Licht der LED einzugrenzen. Die Bildrate der Kamera wird auf 20.000 kHz eingestellt. Damit ist es möglich, die Bildrate in etwa den zu erwartenden Strömungsphänomenen anzupassen. Die Aufzeichnung erfolgt bei einer reduzierten Auflösung von  $512 \times 256$  px.

Die gleichmäßige Ausleuchtung des Messobjekts erfolgt mit einer kollimierten LED und anschließenden Aufweitung mit einer FRESNELLinse. Über einen kegelförmigen Prüfling (Referenzpunkt), der vorübergehend auf die Kerosin-Austrittsöffnung (der Brennkammerinnenbereich ist vor den Messungen zugänglich) gesetzt wird, kann die Kamera auf einen relativ kleinen Bereich (Tiefenschärfe des Messvolumens) über der Austrittsöffnung fokussiert werden. Für eine spätere Veränderung des Fokus wird das Objektiv mit einem fernsteuerbaren (der Prüfstand ist in der Regel während des laufenden Betriebs nicht betretbar) Schrittmotor-Aufsatz ausgestattet, der bei Bedarf von der Prüfwarte aus bedient werden kann. Um die Software der Kamera außerhalb des Prüfstands zu bedienen, wird der entsprechende Rechner ebenfalls mit einem Fernzugriff eingerichtet.

Nachdem alle Aufbau- und Justierarbeiten abgeschlossen sind, bzw. erste Testläufe mit einer Kerze (um die Flamme des Brenners zu simulieren) absolviert sind, wird der Prüfstand in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme erfolgt mit der Zündung des Brenners und einer anschließenden Aufheizphase, in der sich der gesamte Prüfstand um einige wenige Millimeter vertikal ausdehnt. Nach Erreichen eines festgelegten Betriebspunktes, kann mit einer elektronisch gesteuerten Traverse der komplette EDS an beliebige Messpunkte verfahren werden. Dies ist zum einen nötig, um die hitzebedingten Verschiebungen auszugleichen, zum anderen um an unterschiedlichen Stellen des Brenners zu messen, ohne dabei den gesamten optischen Aufbau verändern zu müssen. Wird die



Brennerflamme mit der gepulsten LED beleuchtet, können die Schattenaufnahmen angefertigt werden. Hierbei wird durch gleichzeitige Triggerung der Kamera mit der LED erreicht, dass der CMOS-Bildsensor der Hochgeschwindigkeitskamera immer nur zum Zeitpunkt des Lichtpulses belichtet wird. Wird eine komplette Reihe von Bildern aufgenommen, können die Sequenzen bei der anschließenden Betrachtung langsam abgespielt werden, um so die hochfrequenten Vorgänge in der Strömung dem menschlichen Auge erfassbar zu machen.

Einige exemplarische Beispiele dieser Bildserien werden im folgenden gezeigt. Abbildung 5.12 zeigt eine repräsentative Schattenbildaufnahme des Kerosinsprays aus einer kontinuierlichen Serie, aufgenommen bei einer Bildwiederholfrequenz von 20 kHz.



Abbildung 5.12: Schattenbildaufnahme eines Kerosinsprays in einer Brennkammer stromab eines Drallzerstäubers, aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bei einer Bildfolgefrequenz von 20 kHz

Die Pulsbreite der getakteten LED beträgt  $t_{pulse} = 2 \mu s$  bei einem Strom  $I_f = 5 A$ . Die Belichtungszeit des CMOS Bildsensors beträgt entsprechend der Bildwiederholfrequenz  $50 \mu s$ . Zur Kontrastverbesserung der Schattenbilder werden mehrere Bildverarbeitungsschritte durchgeführt. Zur Kompensation der ungleichmäßigen Intensitätsverteilung der Beleuchtungsquelle wird zunächst ein Bild der maximalen Pixelintensitäten aus 1000 Bildern der jeweiligen Bildserie bestimmt (siehe Abb. 5.13). Idealerweise wird diese Aufnahme in Abwesenheit des Kerosinsprays gemacht, was in dieser Anwendung jedoch nicht möglich ist, da sich gegenüber dem Ruhezustand signifikante Veränderungen ergeben, die ohne Verbrennung nicht erfasst werden können (z. B. Effekte durch Flammenleuchten, Bewegung der Brennkammer etc.). Aufgrund der hohen statistischen Fluktuation der Pixelintensitäten ermöglicht die hohe Anzahl der Bilder durch Extraktion der jeweils hellsten Pixel dennoch eine näherungsweise Bestimmung der Bildausleuchtung.

Abbildung 5.13 zeigt neben Kameraartefakten am linken und rechten Bildrand (vertikale Streifen) auch unscharfe Abbildungen von Kratzern oder Partikeln auf den Fenstern der Brennkammer.

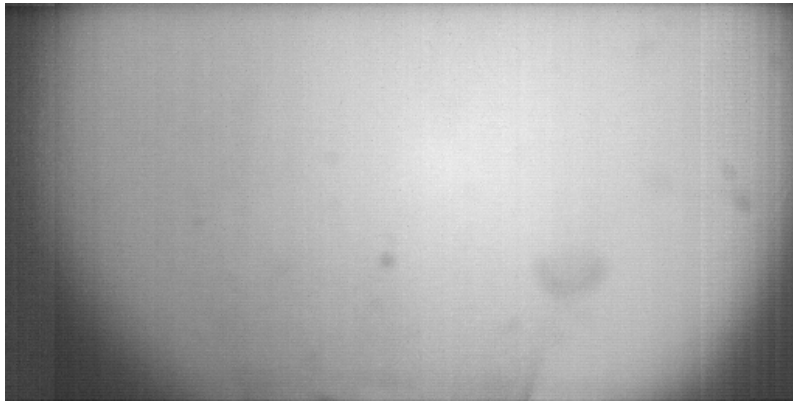


Abbildung 5.13: Aus einer Bildserie von 1000 Schattenbildaufnahmen berechnete Intensitätsverteilung der Beleuchtungsquelle

Um die effektive Intensitätsveränderung in Folge der Schattenbildung zu erhalten, werden im zweiten Bearbeitungsschritt die Einzelbildaufnahmen der Bildserie von der berechneten Maximalintensitätsverteilung abgezogen. Abbildung 5.14 zeigt das daraus resultierende Differenzbild, das relativ stark von Kamerarauschen gekennzeichnet ist.

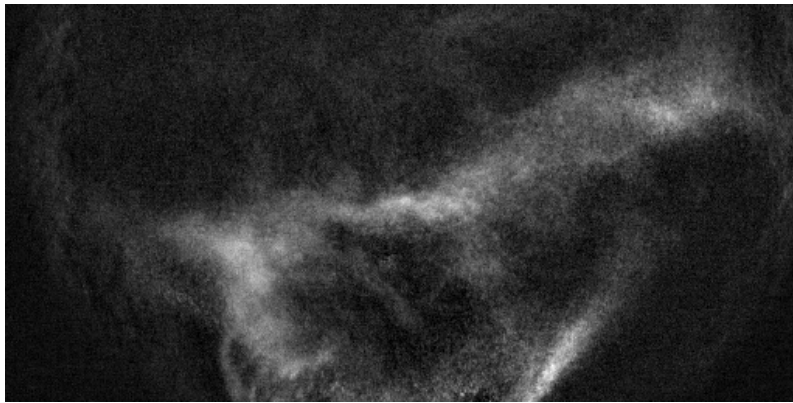


Abbildung 5.14: Differenzbild nach Abzug des Rohbildes in Abb. 5.12 von der Intensitätsverteilung in Abb. 5.13

Durch Filterung mit einem  $3 \times 3$  Medianfilter wird das Rauschen bereinigt. Diese Filterung bewirkt eine Reduktion der Ortsauflösung, welche durch die starken Einflüsse der Schlierenbildung in der Flamme ohnehin schon reduziert ist. Daher ist die zusätzliche Filterung vertretbar.

Abbildung 5.15 zeigt das mit einem Medianfilter vom Rauschen bereinigte Bild.

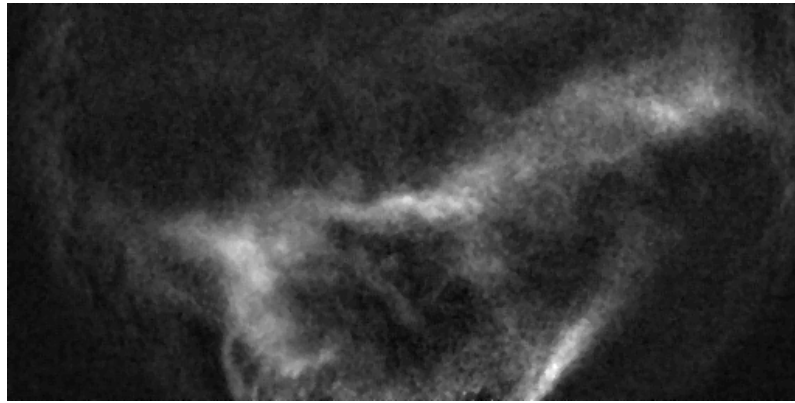


Abbildung 5.15: Anwendung eines Medianfilters zur Unterdrückung von Kamerarauschen in Abb. 5.14

Zur besseren Visualisierung der zeitlich veränderlichen Kerosinsprayverteilung wird die Intensitätsverteilung zusätzlich gespreizt und in Falschfarben kodiert. Abbildung 5.16 zeigt das in Falschfarben dargestellte Bild.

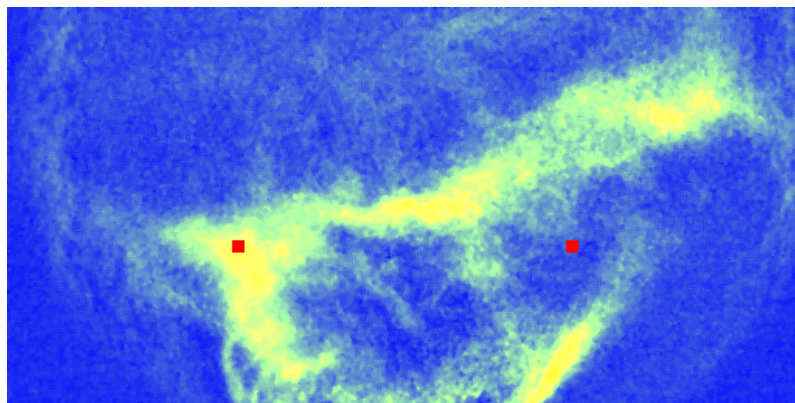


Abbildung 5.16: Falschfarbendarstellung der instantanen Kerosinsprayverteilung nach Bildbearbeitung der in Abb. 5.12 gezeigten Aufnahme. Die beiden roten Punkte markieren die Abfragepositionen der Pixelintensitäten in der späteren statistischen Auswertung

Die Abbildungen 5.17 und 5.18 zeigen eine Abfolge von 10 zeitlich aufeinander folgenden Bildern, in denen der Ablösevorgang von Kerosinsprayschwaden vom Brennermund in den Brennraum hinein deutlich zu erkennen ist. Weiter stromab, d. h. mit zunehmender Entfernung vom Brennermund zum oberen Bildrand hin, verdampfen die Kerosintropfen und sind daher nicht mehr auf den Schattenaufnahmen nachweisbar.

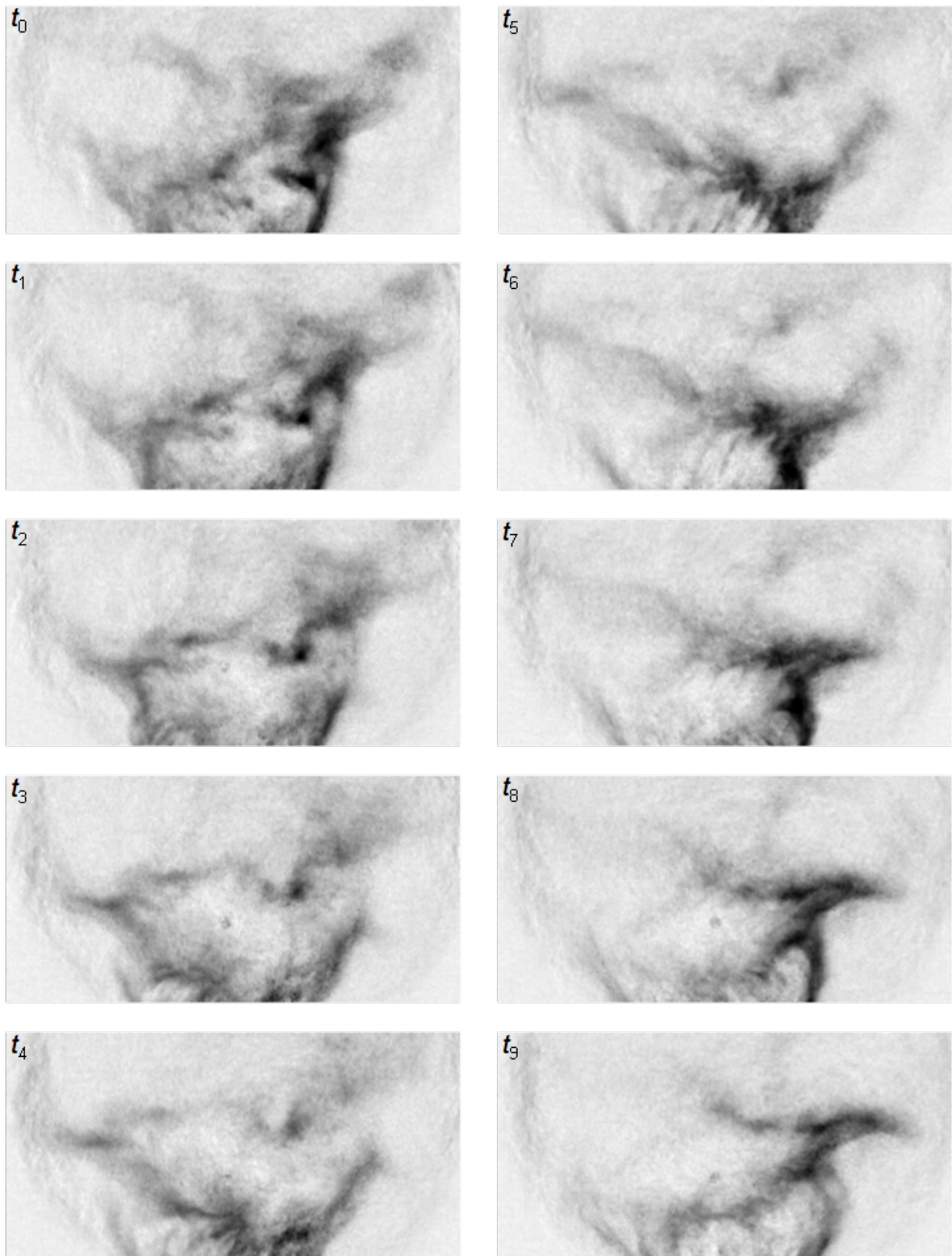


Abbildung 5.17: Bildserie nach dem Schattenverfahren aufgezeichnet; zu sehen ist die Zirkulation eines Verbrennungs-Wirbels, der sich gegen den Uhrzeigersinn über der Kerosin-Austrittsöffnung ausbreitet



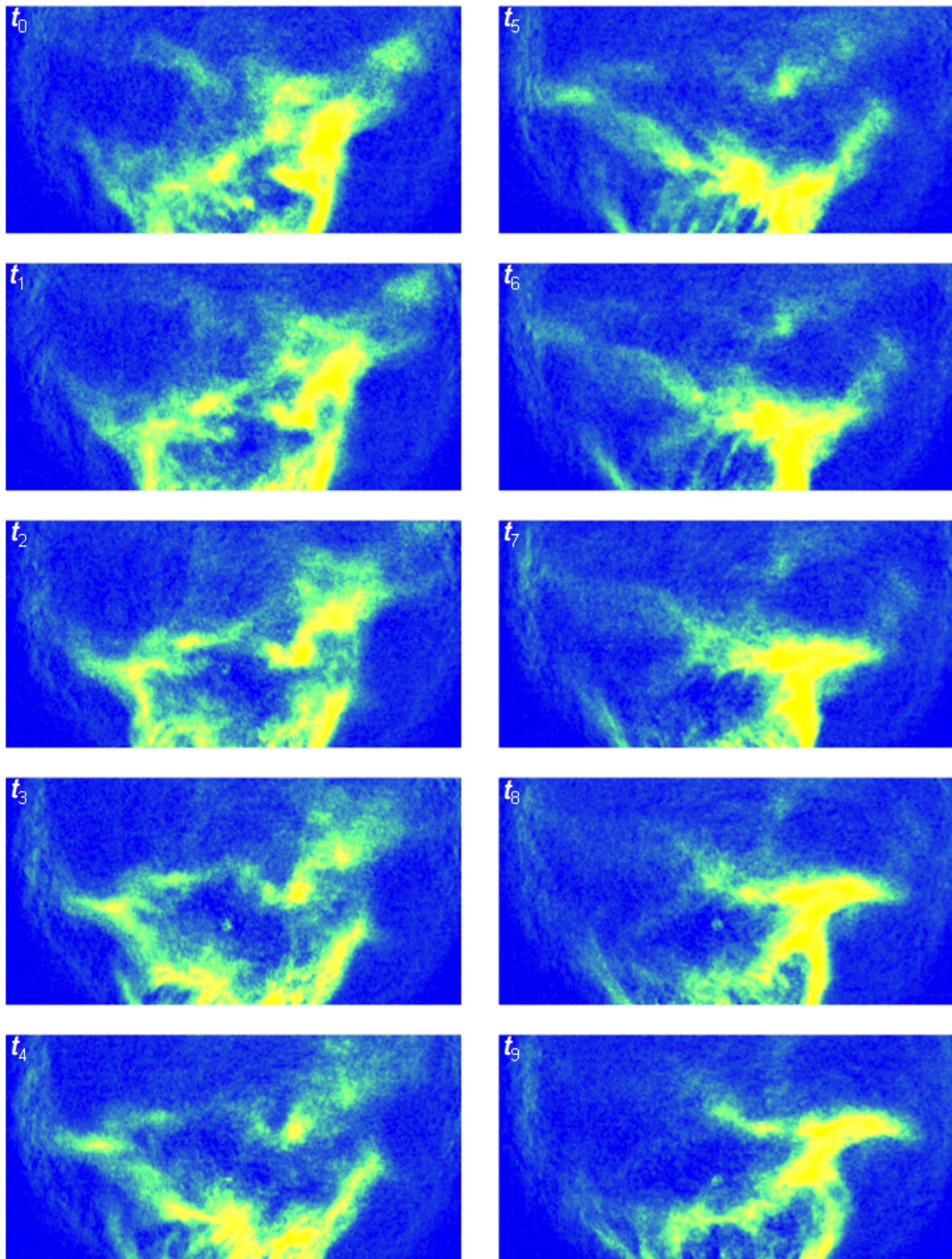


Abbildung 5.18: Bildserie (eingefärbt) nach dem Schattenverfahren aufgezeichnet; zu sehen ist die Zirkulation eines Verbrennungs-Wirbels, der sich gegen den Uhrzeigersinn über der Kerosin-Austrittsöffnung ausbreitet

Durch die relativ große Zahl der Bilder bei gleichzeitig hoher zeitlicher Auflösung wird eine statistische Betrachtung der Daten ermöglicht. Wird ein einzelnes Bildelement über einen längeren Zeitraum betrachtet, erhält man einen Zeitschrieb, der die periodisch wiederkehrenden Vorgänge der Sprayablösung wiedergibt. Abbildung 5.19 und 5.20 zeigen den Zeitschrieb und das Frequenzspektrum.

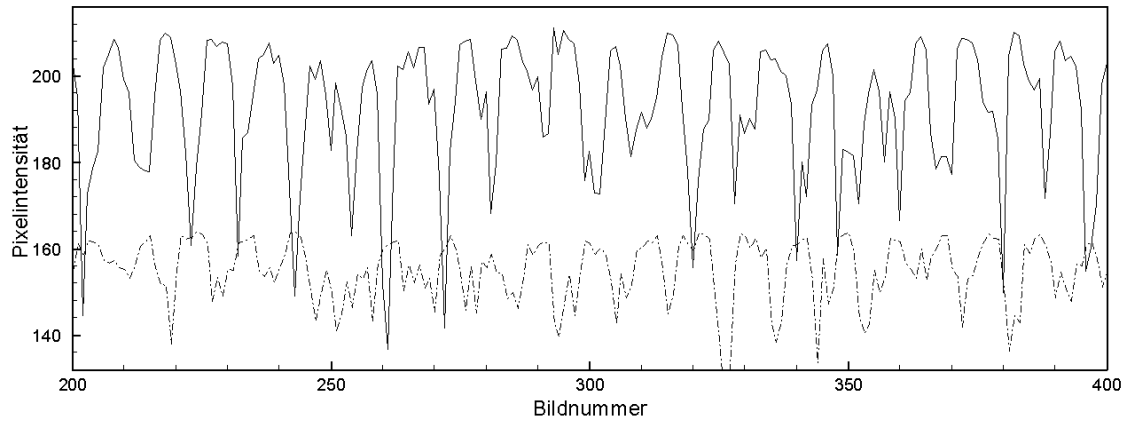


Abbildung 5.19: Zeitlicher Verlauf der lokalen Pixelintensität an 2 Punkten 15 mm über dem Brenner für 200 der insgesamt 1000 verfügbaren Bilder

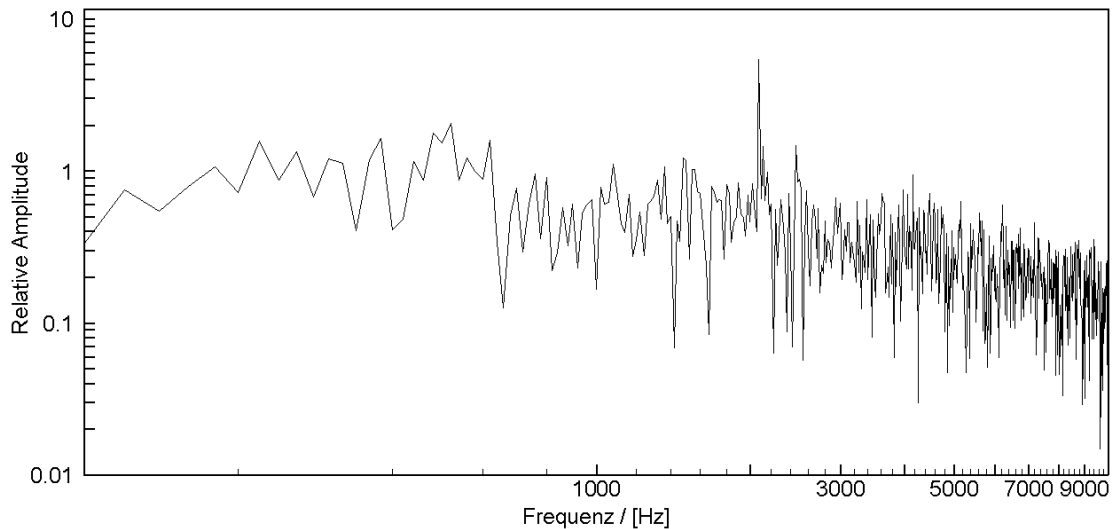


Abbildung 5.20: Frequenzspektrum der in Abb. 5.19 gezeigten lokalen Pixelintensität an 15 mm über dem Brenner. Die dominante Frequenz liegt bei  $2080 \pm 10$  Hz

Durch die in etwa axialsymmetrische Anordnung der beiden Abfragepunkte ist ein Phasenversatz der beiden Signale von ca.  $180^\circ$  zu erkennen. Eine FOURIERanalyse erlaubt

die Bestimmung der mittleren Frequenz, mit der die Kerosinschwaden an der respektiven Bildposition vorbeiziehen. Ein auf diese Weise berechnetes Frequenzspektrum wird in Abbildung 5.20 gezeigt und weist eine dominante Frequenz bei  $2080 \pm 10$  Hz auf, die mit dem periodischen Ablösevorgang der Kerosinschwaden des Brenners in Zusammenhang steht. Die hier gezeigten zeitaufgelösten Visualisierungen liefern wichtige Informationen, die mit konventioneller Kameratechnik nicht erkennbar sind; z. B. erscheint das Kerosinspray homogen verteilt in Form eines Kranzes über dem Brennermund (siehe Abb. 5.21), während die Bildsequenzen auf einen umlaufenden Ablösevorgang des Sprays am Brennermund zu deuten scheinen, dessen Frequenz bei ca. 2.08 kHz liegt. Abbildungen 5.21 und 5.22 zeigen Einzelbilder einer Videosequenz des Kerosinsprays mit und ohne Verbrennung im EDS.

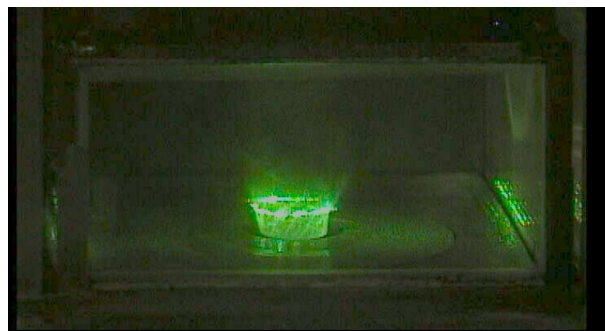


Abbildung 5.21: Einzelbild des Kerosinsprays in einer Brennkammer am EDS; ohne Verbrennung; Bildquelle: Dr. U. Meier, DLR Köln, Abteilung Brennkammer (AT-TM)

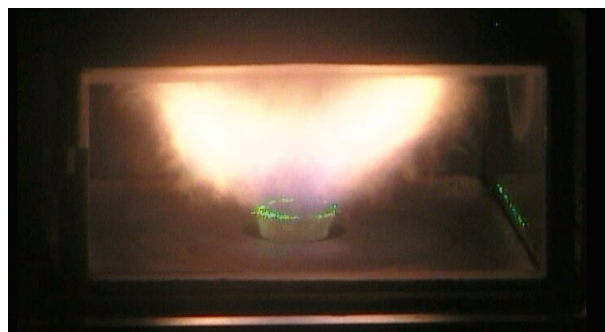


Abbildung 5.22: Einzelbild des Kerosinsprays in einer Brennkammer am EDS; mit Verbrennung; Bildquelle: Dr. U. Meier, DLR Köln, Abteilung Brennkammer (AT-TM)

Das grüne Licht in den Abbildungen ist Mie-Streuung am Kerosinspray, welches durch einen parallel aufgespannten Lichtschnitt durchströmt

## 5.2 Weitere mögliche strömungsmesstechnische Verfahren mit LED als Beleuchtungsquelle

### 5.2.1 Schlierenmesstechnik

In Kapitel 5.1.2 wird das relativ einfach umzusetzende Schattenwurfverfahren vorgestellt, bei dem eine gepulste Leistungs-LED als Lichtquelle verwendet wird.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Schlierenmesstechnik ist ebenfalls mit relativ geringem Aufwand zu realisieren. Auch hier wird in Erwägung gezogen, eine gepulste LED als Lichtquelle einzusetzen. Bei der Schlierenmesstechnik werden auf dem Messbereich auftreffende Strahlen in einer Sammellinse fokussiert und durch vorherrschende Dichtegradienten mit verschiedenen Brechungsindizes unterschiedlich gebrochen und abgelenkt.

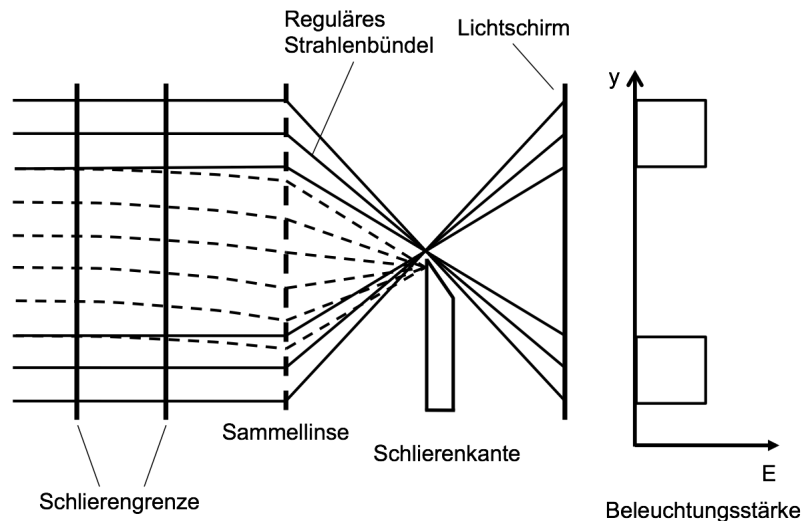


Abbildung 5.23: Prinzipskizze des Schlierenverfahrens; aus [22]

Am Brennpunkt der Sammellinse befindet sich eine Blende (Schlierenkante) wodurch die Strahlen teilweise ausgeblendet werden, was auch kontrastverstärkenden Einfluss hat. Dadurch ergeben sich Intensitätsdifferenzen, die z. B. von einer CCD-Kamera erfasst werden können. Die Dichteschwankungen (Dichtegradienten) basieren auf der Grundlage unterschiedlicher Brechungsindizes  $n^3$ , die z. B. durch Temperaturdifferenzen innerhalb einer Brennkammer vorherrschen. Durch die Ausdehnung von Gasen oder Flüssigkeiten, die mit Temperaturerhöhung einhergeht, nimmt die ortsabhängige optische Dichte ab.

<sup>3</sup> $n = c_0/c$  mit  $c_0$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum;  $c$ : Lichtgeschwindigkeit im Medium



Das hat zur Folge, dass der jeweilige Brechungsindex kleiner wird. Entsprechend größer wird der Brechungsindex, wenn die Temperatur sinkt. Diese Veränderungen der Indizes, welche auch als Brechungsindex-Gradienten bezeichnet werden, macht man sich zu Nutze, um Teilchen, Tröpfchen oder andere Strukturen sichtbar zu machen. Abbildung 5.23 zeigt die Prinzipskizze der Schlierenmesstechnik, bei der die Verwendung einer gepulsten LED als Beleuchtungsquelle als möglich erscheint.

## 5.2.2 Background Oriented Schlieren (BOS)

Die BOS-Methode (Hintergrundschlieren-Methode) dient der Sichtbarmachung von Dichtegradienten in Strömungen. Dieser in Kapitel 5.2.1 beschriebene Effekt beruht auf Ablenkung von Lichtstrahlen aufgrund von Brechungsindexgradienten. Zusätzlich zu diesem Effekt wird bei der BOS-Methode der Hintergrund mit kleinen unregelmäßig verteilten Punkten (Speckle<sup>4</sup>-Muster) versehen und bei bekanntem homogenen Brechungsindexfeld als Referenzbild aufgenommen. Das zweite Bild (Messbild) wird gemeinsam mit dem Hintergrundmuster durch die zu untersuchenden Brechungsindexgradienten hindurch (z. B. einer Brennerflamme) aufgenommen. Im Vergleich zum Referenzbild befinden sich die Hintergrundpunkte, bedingt durch Ablenkung, an einer anderen Stelle. Abbildung 5.24 zeigt die Prinzipskizze der Hintergrundschlieren-Methode.

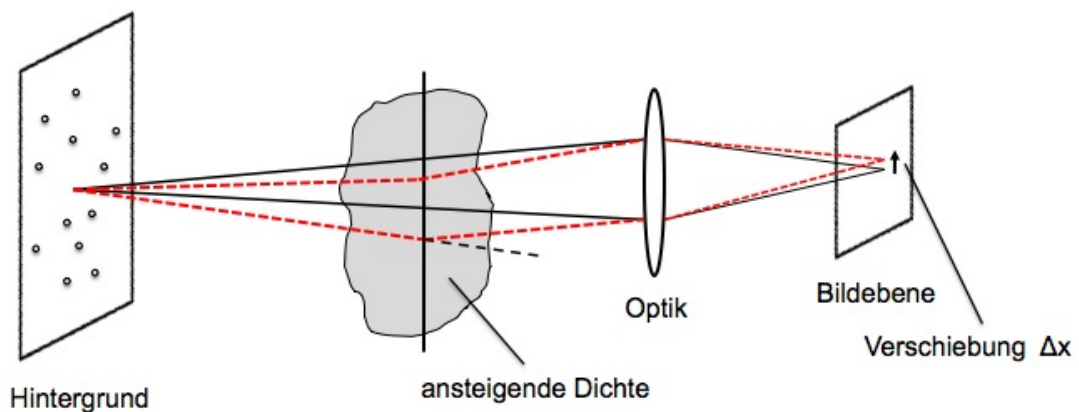


Abbildung 5.24: Prinzipskizze der Hintergrundschlieren-Methode; der rote gestrichelte Strahlengang resultiert aus der Ablenkung durch die Dichtegradienten (ansteigende Dichte); aus [23]

<sup>4</sup>Interferenzerscheinung an einer optisch rauen Oberfläche, die mit einer kohärenten (Lichtwellen mit fester Phasenbeziehung) Lichtquelle beleuchtet wird.

Durch Anwendung einer Kreuzkorrelation können die Verschiebungen der Punkte exakt bestimmt werden [23]. Man erhält ein Verschiebungsfeld, aus dem über die Kenntnis des Ablenkungsortes auf die Ablenkungswinkel geschlossen werden kann. Des Weiteren kann über die Kenntnis des Ablenkungswinkels, der Wellenlänge der Beleuchtungsquelle und der optischen Eigenschaften (Brechungsindexvariation bzw. Lichtstrahlablenkung) auf die örtlichen Dichtewerte (dient z. B. der Bestimmung von Gaskonzentrationen) geschlossen werden. Die ansteigende Dichte, die in Abbildung 5.24 grau angedeutet ist, führt zu einem Versatz (Verschiebung  $\Delta x$ ) in der Bildebene, der mit Hilfe des Referenzbildes (vom Hintergrund) und Kreuzkorrelationsalgorithmen ausgewertet werden kann. Bislang verwendet man für die BOS-Methode gepulste Laser oder Halogen-Strahler (kW-Bereich). In letzterem Fall wird die Kamera für wenige  $\mu s$  belichtet. Neben hohen Anschaffungs- und Betriebskosten für Laser-Systeme (siehe Kap. 5.1.1) haben die Halogen-Strahler den Nachteil der starken Hitzeentwicklung, die u. a. zu Verfälschungen der Schliereffekte und somit der Messergebnisse führen kann. Zusätzlich wird nur ein Bruchteil des verfügbaren Lichts während der kurzen Dauer der Belichtung genutzt. Die LED und der LED-Treiber hingegen bieten im Vergleich zu einem Laser-System einen deutlich niedrigeren Anschaffungspreis und deutlich reduzierte Wartungskosten bei gleichzeitig einfacherer Handhabung. Gegebenenfalls muss die LED nach Erreichen der Lebensdauer, die möglicherweise durch Überschreiten der Betriebspunkte verkürzt wird, ausgewechselt werden. Des Weiteren werden beim gepulsten Betrieb der LEDs keine signifikanten Hitzeentwicklungen festgestellt (Ausnahme: PicoLAS Treiber mit CBT-120 bei  $10 \mu s$ , 50 A und 2 kHz, was aber mit aktiver Kühlung gelöst werden kann). Die rechteckige Form der LEDs Luminus CBT-40 und CBT-120 ermöglicht zudem eine sehr homogene Ausleuchtung des BOS Hintergrundmusters bei relativ geringem Aufwand (Kondensorlinsen).

### 5.2.3 Tomographic PIV/3-D Particle tracking

Wohl eine der vielversprechendsten Anwendungsmöglichkeiten von gepulst betriebenen Hochleistungs-LEDs sind Strömungsmessverfahren, die das Geschwindigkeitsfeld in einem Volumen aufgelöst erfassen können. Hierzu wird die Partikel dotierte Strömung nicht mit einem Lichtschnitt sondern im ganzen Volumen beleuchtet und mit mehreren Kameras ( $> 3$ ) aus verschiedenen Richtungen beobachtet. Photogrammetrische Verfahren (Methoden zur Bildmessung) werden zur Rekonstruktion der 3-D Partikelverteilung eingesetzt. Ähnlich wie bei PIV kann aus mindestens zwei zeitlich aufeinander folgenden Aufnahmen der Partikelverteilungen dann auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlos-

sen werden [24, 25, 26]. Der Vorteil bei der Nutzung der LED gegenüber einem Laser ist, dass diese Verfahren nicht zwingend kollimiertes Licht erfordert. Zur Steigerung der Lichtausbeute können auch mehrere LEDs zusammen geschaltet werden [25]. Die Kostenersparnis gegenüber einem Laser ist gegeben.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit werden unterschiedliche Leistungs-LEDs mit gepulsten Strömen betrieben. Die Ansteuerung der LEDs erfolgt mit speziellen Treibern, die Ströme von über 50 A erzeugen können. Anhand verschiedener Versuche kann u. a. eine Steigerung der Lichtausbeute nachgewiesen werden.

Nachdem im Kapitel 2 die allgemeinen Grundlagen der LED, wie Rekombinationsprozesse in Halbleitern und Charakteristiken der LED und im Kapitel 3 die optisch zu vermessenden LEDs und die Treiberkonzepte vorgestellt werden, sind im Kapitel 4 die Messverfahren und Auswertungen zu sehen. Im Kapitel 5 wird die Anwendung von LEDs anhand verschiedener Versuche in der Strömungsmesstechnik gezeigt.

Die LEDs werden bei den durchgeführten Versuchen mit einem Fotodetektor, einer ULBRICHTkugel und einem Spektrometer vermessen. Es werden Messungen mit verschiedenen Strömen bei einer Pulsbreite von  $1\,\mu\text{s}$  und einer Frequenz von 1 kHz durchgeführt. Bei der optischen Vermessung mit dem Fotodetektor (siehe Kap. 4.1) wird das emittierte Licht der LEDs kollimiert und mit einer Fotodiode gemessen. In der grafischen Auswertung der Messergebnisse kann über einen bestimmten Bereich hinweg ein linearer Verlauf des ansteigenden LED-Stroms zum Fotodioden-Strom gezeigt werden. Das sublineare Verhalten bzw. die Sättigung, das im oberen Bereich des maximal möglichen Treiber-Stroms in den Auswertungen zu erkennen ist, kann u. a. auf eine Strombegrenzung des Treibers zurückgeführt werden. Die Ansteuerung der LEDs mit Treibern, die Ströme über 50 A erzeugen, könnte darüber Aufschluss geben. Mit der spektralen Vermessung der LEDs (siehe Kap. 4.2) bei ansteigenden Strömen kann die quantitative Verschiebung der Spektren erfasst werden. Anhand der gezeigten Messkurven ist ein deutlicher Wellenlängen-Shift beim Anstieg der Ströme hin zu kürzeren Wellenlängen zu erkennen. Bei der spektralen Betrachtung ist auffällig, dass die grünen und cyanfarbigen LEDs eine deutliche Frequenzverschiebung aufweisen (ca. 20 bis 30 nm), hingegen nicht die im roten Spektrum emittierende LED. Unterschiedliche Kristallsubstrate

in den LEDs können u. a. hierfür ursächlich sein. Die relative Empfindlichkeit des Spektrometers und die spektrale Empfindlichkeit der CCD-Kamera wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Diese Empfindlichkeiten könnten bei weiteren Versuchen in die Ergebnisse mit einfließen. Bei der Vermessung mit einer ULBRICHTkugel (siehe Kap. 4.3) kann durch eine richtungsunabhängige Bewertung die Steigerung der Lichtausbeute beim Anstieg der LED-Ströme gezeigt werden. Dies wird anhand im grünen Spektrum emittierender LEDs gezeigt. Für eine quantitative Bestimmung des Lichtstroms bzw. der Strahlungsleistung könnten bei weiteren Messungen die LEDs zusammen mit der ULBRICHTkugel und z. B. einem mit der  $V(\lambda)$ -Kurve korrigiertem Fotometer untersucht werden.

Die in den Versuchen ermittelten Messungen und Ergebnisse werden im Rahmen dieser Diplomarbeit für einige Experimente in der Strömungsmesstechnik eingesetzt. Dabei werden Strömungsmessungen mit der PIV (siehe Kap. 5.1.1) und dem Schattenwurfverfahren (siehe Abb. 5.1.2) mit gepulsten Leistungs-LEDs als Lichtquelle realisiert. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die LED in bestimmten Anwendungsbereichen eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Lichtquellen ist.

Des Weiteren werden in Kapitel 5.2 Strömungsmesstechnische Verfahren vorgestellt, bei denen der Einsatz der LED ebenfalls als möglich erscheint.

Am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR in Göttingen werden zur Zeit weitere Untersuchungen zu den Grenzen der aktuell verfügbaren Hochleistungsdioden durchgeführt. Hierzu wird ein kürzlich entwickelter Treiber, der Pulsströme von über 300 A liefern kann verwendet. Diese Untersuchungen sind Gegenstand laufender Forschungen. Durch die in der vorliegenden Diplomarbeit gezeigten Ergebnisse können Steigerungsmöglichkeiten bezüglich der Lichtausbeute vermutet werden.

# A Anhang

## A.1 Gegenüberstellung der radiometrischen und fotometrischen Größen

Radiometrie (sichtbares Licht)			Fotometrie (gesamter Wellenlängenbereich)		
Lichtstrom	$\Phi_v$	lm (Lumen)	Strahlungsleistung	$\Phi_e$	W
Lichtstärke	$I_v$	lm/sr (Steradian)	Strahlstärke	$I_e$	W/sr
Lichtmenge	$Q_v$	lms	Strahlungsenergie	$Q_e$	Ws bzw. J
Leuchtdichte	$L_v$	lm/m <sup>2</sup> sr	Strahldichte	$L_e$	W/(m <sup>2</sup> sr)
Beleuchtungsstärke	$E_v$	lm/m <sup>2</sup>	Bestrahlungsstärke	$E_e$	W/m <sup>2</sup>
Belichtung	$H_v$	lms/m <sup>2</sup>	Bestrahlung	$H_e$	Ws/m <sup>2</sup>
Lichtausbeute	$\eta$	lm/W	Strahlungsausbeute	$\eta$	$[\eta] = 1$

Tabelle A.1: Radiometrische und fotometrische Größen [27]

## A.2 Schaltplan des LED-Treibers

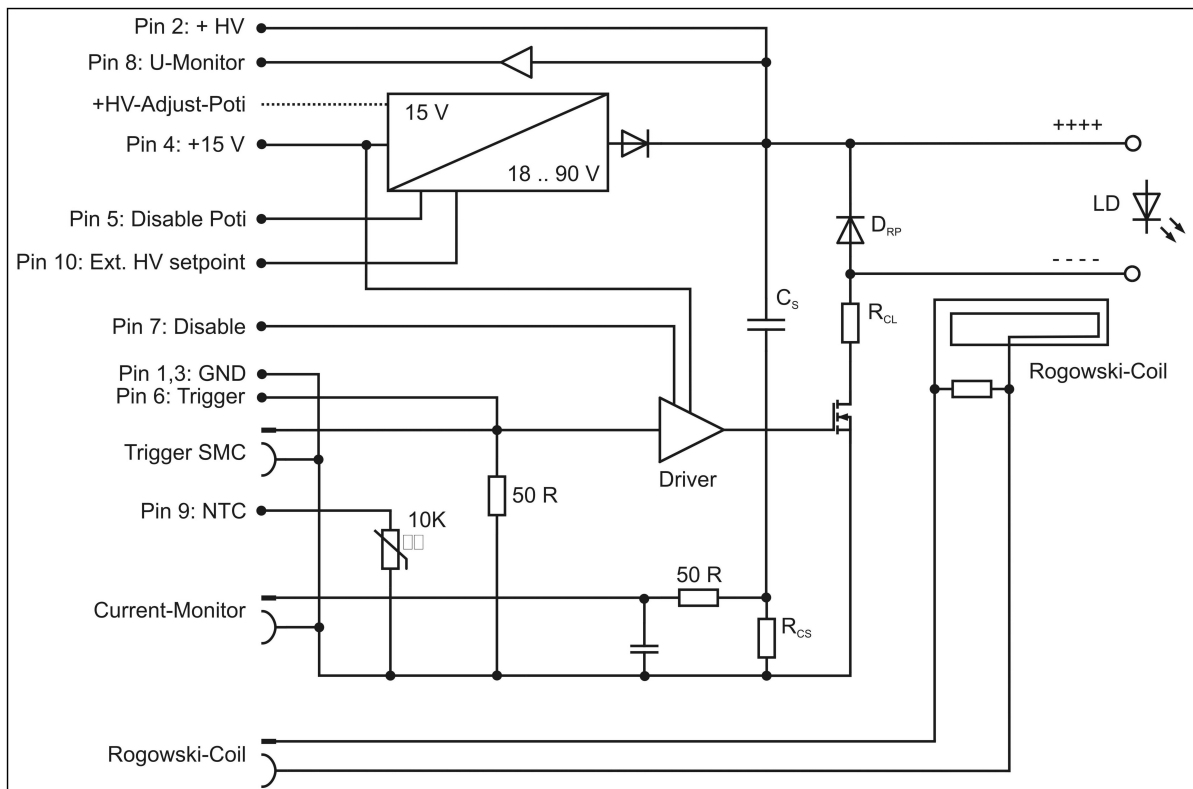


Abbildung A.1: Schaltplan des Treibers LDP-V 50-100 V3; aus [28] S. 9

### A.3 Spektrale Augenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge

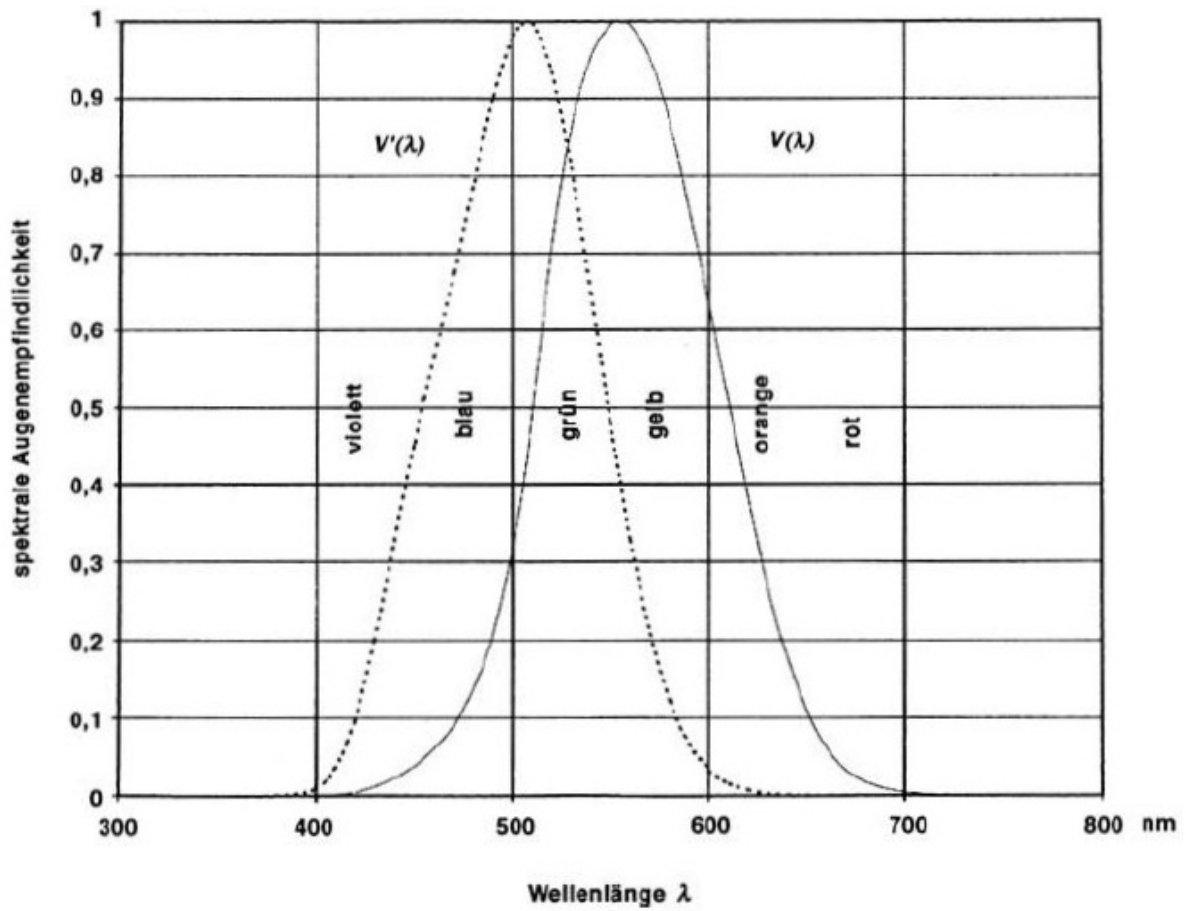


Abbildung A.2: Spektrale Augenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge [nm]; aus [27] S. 18



## A.4 Spektrale Empfindlichkeits-Kurve der Fotodiode FDS010 Si

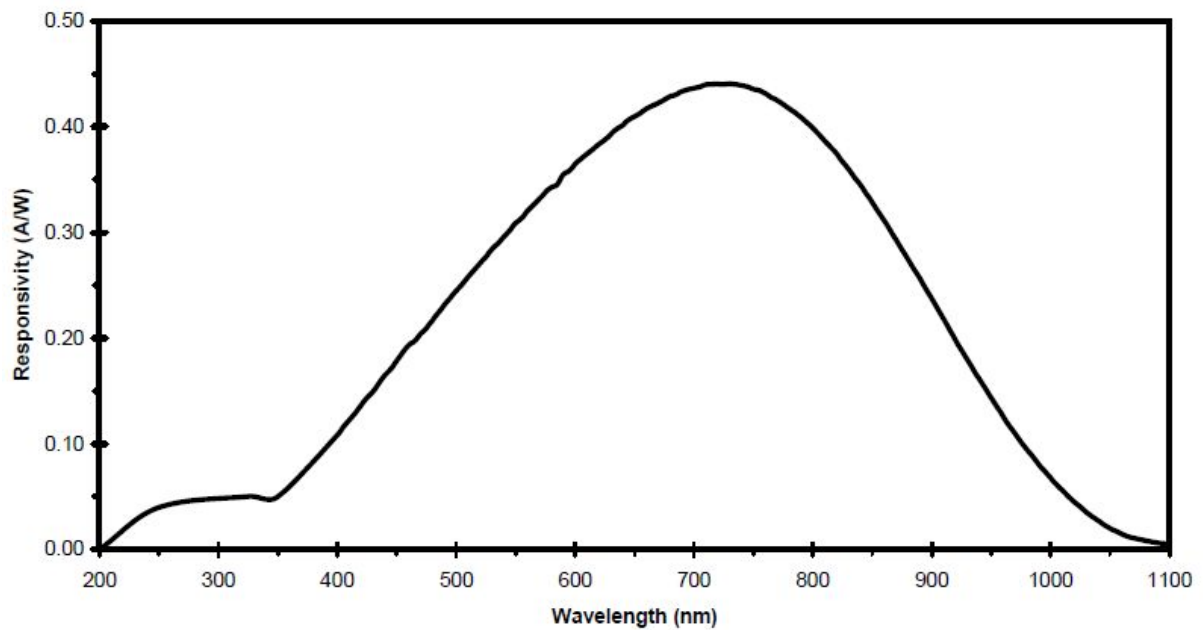


Abbildung A.3: Spektrale Empfindlichkeit [A/W] der Fotodiode FDS010 Si in Abhängigkeit von der Wellenlänge [nm]; aus [29] S. 2

## A.5 Abstrahlcharakteristik der Philips Luxeon III red und red-orange

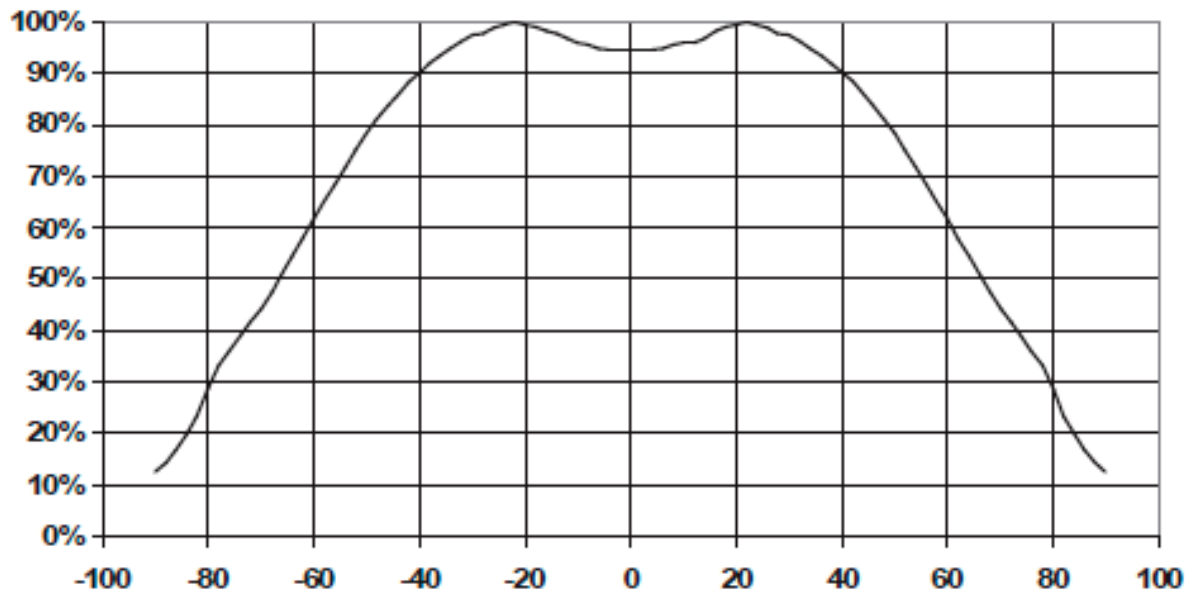


Abbildung A.4: Abstrahlcharakteristik (Lambertian Emitter) der Philips Luxeon III, red und red-orange; Zusammenhang der Intensität [%] und des Abstrahlwinkels [°]; aus [10] S. 13

## A.6 Abstrahlcharakteristik der Philips Luxeon V green und cyan

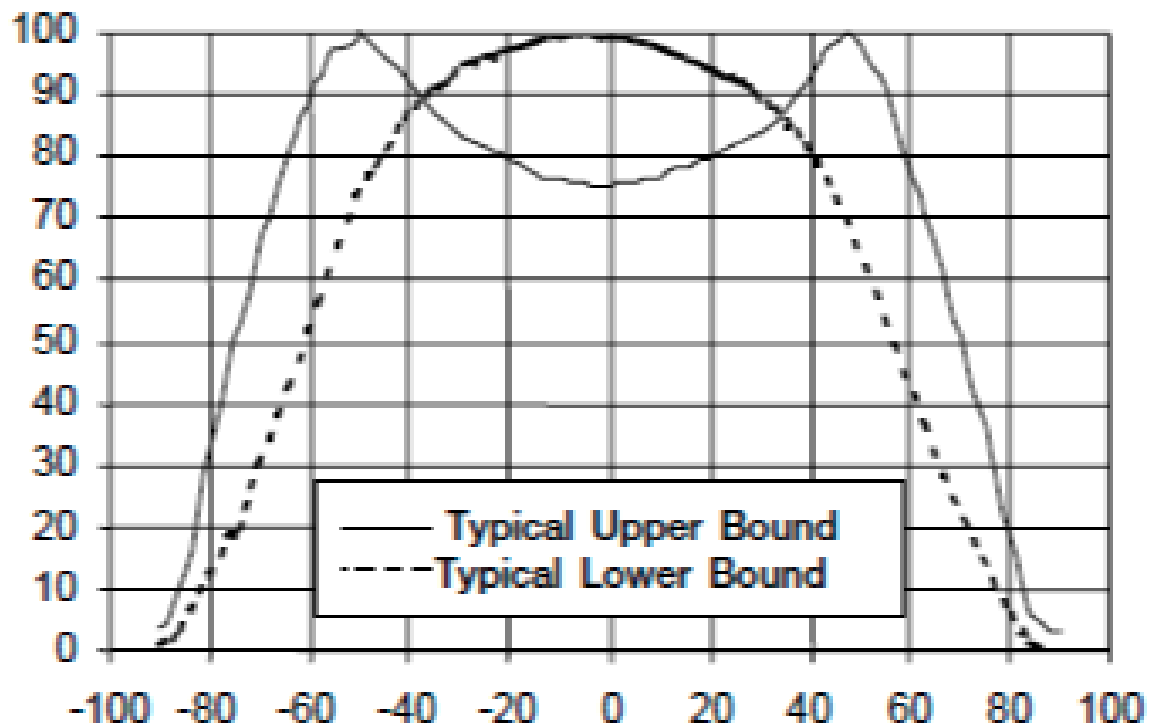


Abbildung A.5: Abstrahlcharakteristik (Lambertian Emitter) der Philips Luxeon V, green und cyan; Zusammenhang der Intensität [%] und des Abstrahlwinkels [°]; aus [7] S. 6

## A.7 Quantenausbeute der Kamera PCO SensiCam QE

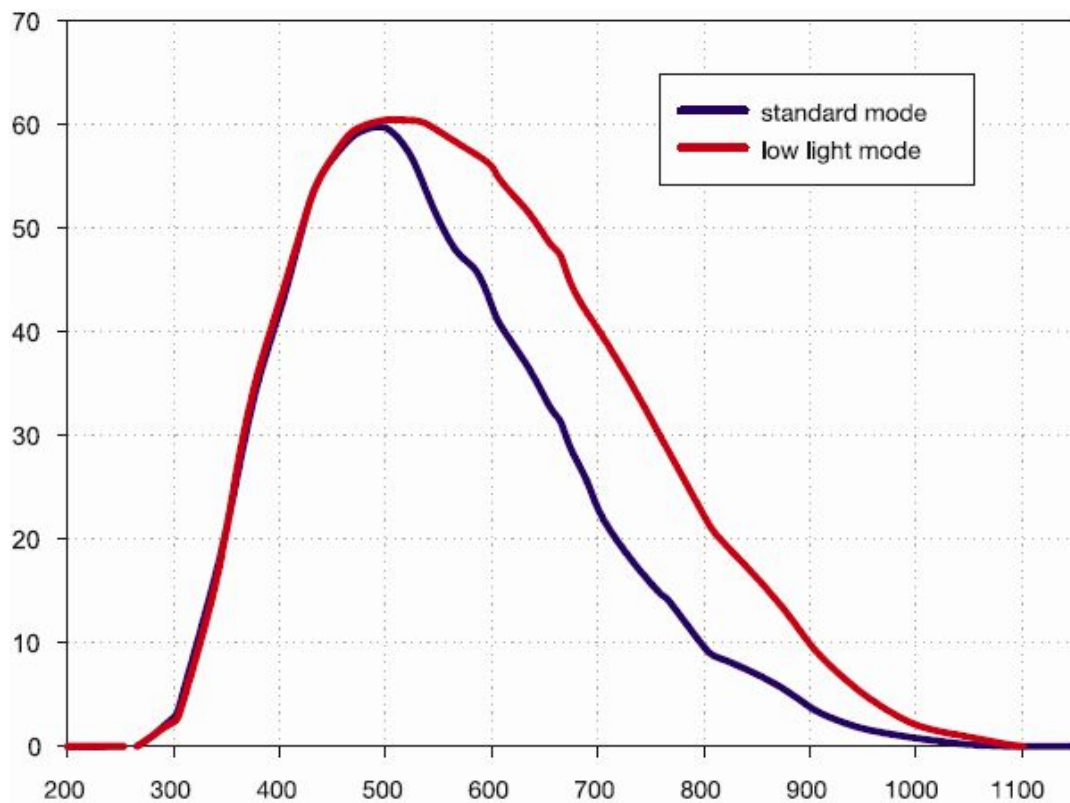


Abbildung A.6: Quantenausbeute [%] der PCO SensiCam QE in Abhängigkeit von der Wellenlänge [nm]; die Kamera wurde im “Standard Mode“ betrieben

# Abkürzungsverzeichnis

AFR .....	Air Fuel Ratio
BOS .....	Background Oriented Schlieren
CCD .....	Charge Coupled Device
CIE .....	Commission Internationale de l'Éclairage
CMOS .....	Complementary Metal Oxide Semiconductor
cw .....	Continuous Wave
DH-Struktur .....	Doppelheterostruktur
EDS .....	Ein-Düsen-Sektor
ESR .....	Equivalent Series Resistance
EuP-Richtlinie .....	Eco-Design Requirements for Energy-Using Products
fps .....	Frames per Second
HeNe .....	Helium-Neon
KDP-Kristall .....	Kaliumdihydrogenphosphat-Kristall
LED .....	Light Emitting Diode
MOSFET .....	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
ND-Filter .....	Neutral-Dichte-Filter
Nd:YAG .....	Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
OPV .....	Operationsverstärker
RLZ .....	Raumladungszone
SMD .....	Surface Mounted Device

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Bandstruktur eines Halbleiters . . . . .	11
2.2	Mit Fremdatomen dotierte Bandlücken eines Akzeptor- und Donatorniveaus	12
2.3	Rekombination unter Störstellenbeteiligung unter Aussendung von Photonen	13
2.4	pn-Übergang einer LED . . . . .	14
2.5	Kantenemitter (PpN) . . . . .	15
2.6	Aufbau der DH-Struktur einer AlInGaP-LED . . . . .	16
2.7	Philips Luxeon V Star und Luminus Phlatlight CBT-120 . . . . .	17
2.8	Abstrahlcharakteristik einer grünen CBT-40 und CBT-120 . . . . .	18
3.1	Schaltungskonzept für LED-Pulser . . . . .	24
3.2	Treiber PicoLAS LDP-V 50-100 V3 mit Leistungs-LED Phlatlight CBT-40	26
3.3	Zerstörte Leistungs-LED Phlatlight CBT-120, green . . . . .	27
4.1	Messaufbau zur Aufnahme des Lichtsignals der LED mit dem verstärkten Fotodetektor PDA10A-EC . . . . .	30
4.2	Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Luxeon LXHL-LD3C, red . . . . .	31
4.3	Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Luxeon LXHL-LM5C, green . . . . .	32
4.4	Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Phlat- light CBT-40, green . . . . .	32
4.5	Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Diodenstrom der LED Phlat- light CBT-120, green . . . . .	33
4.6	Messaufbau zur spektralen Vermessung von LEDs . . . . .	34
4.7	Spektren einer LED Luxeon III Star LXHL-LH3C, red-orange . . . . .	37
4.8	Spektren einer LED Luxeon V Star LXHL-LE5C, cyan . . . . .	37
4.9	Spektren einer LED Luxeon V Star LXHL-LM5C, green . . . . .	38
4.10	Spektren einer LED Phlatlight CBT-40, green . . . . .	38
4.11	ULBRICHTkugel im Messbetrieb . . . . .	40

4.12	Optische Vermessung von grünen LEDs unterschiedlichen Typs in der ULBRICHTkugel . . . . .	41
5.1	Prinzipskizze der PIV . . . . .	43
5.2	Prinzipskizze der PIV auf Basis von gepulsten LEDs . . . . .	45
5.3	Versuchsaufbau für PIV auf Basis von gepulsten LEDs . . . . .	46
5.4	Nahaufnahme Lichtschnittoptik und Wasserbecken . . . . .	46
5.5	Kontrastverstärktes Negativ eines PIV-Einzelbildes . . . . .	47
5.6	Kontrastverstärktes Negativ eines PIV-Einzelbildes, Vergrößerung . . . . .	47
5.7	Ausgewerteter PIV Datensatz . . . . .	48
5.8	Abfolge aus mehreren aufeinander folgenden PIV Datensätze . . . . .	49
5.9	Prinzipskizze des Schattenwurfverfahrens . . . . .	49
5.10	Prinzipskizze des Schattenwurfverfahrens anhand einer Brennkammer . . . . .	50
5.11	Schematische Darstellung des Ein-Düsen-Sektors (EDS) . . . . .	51
5.12	Schattenbildaufnahme eines Kerosinsprays stromab eines Drallzerstäubers . . . . .	53
5.13	Berechnete Intensitätsverteilung aus 1000 Schattenbildaufnahmen . . . . .	54
5.14	Differenzbild nach Abzug des Rohbildes von der Intensitätsverteilung . . . . .	54
5.15	Medianfilterung des Differenzbildes . . . . .	55
5.16	Falschfarbendarstellung der instantanen Kerosinsprayverteilung . . . . .	55
5.17	Messergebnisse Schattenverfahren . . . . .	56
5.18	Messergebnisse Schattenverfahren, eingefärbt . . . . .	57
5.19	Zeitschriebe der lokalen Pixelintensität 15 mm über dem Brenner . . . . .	58
5.20	Frequenzspektrum der lokalen Pixelintensität 15 mm über dem Brenner . . . . .	58
5.21	Einzelbild des Kerosinsprays in einer Brennkammer am EDS; ohne Verbrennung . . . . .	59
5.22	Einzelbild des Kerosinsprays in einer Brennkammer am EDS; mit Verbrennung . . . . .	59
5.23	Prinzipskizze des Schlierenverfahrens . . . . .	60
5.24	Prinzipskizze der Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	61
A.1	Schaltplan des Treibers LDP-V 50-100 V3 . . . . .	67
A.2	Spektrale Augenempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge . . . . .	68
A.3	Spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode FDS010 Si in Abhängigkeit von der Wellenlänge . . . . .	69
A.4	Abstrahlcharakteristik der Philips Luxeon III red und red-orange . . . . .	70
A.5	Abstrahlcharakteristik der Philips Luxeon V green und cyan . . . . .	71

A.6 Quantenausbeute der PCO SensiCam QE in Abhängigkeit von der Wellenlänge . . . . .	72
---	----



# Tabellenverzeichnis

2.1	Häufig verwendete Halbleiter-Materialien . . . . .	16
3.1	Übersicht der LEDs zur Vermessung . . . . .	23
A.1	Radiometrische und fotometrische Größen . . . . .	66

# Literaturverzeichnis

- [1] B. Stasicki, W. Hiller, und G.E.A. Meier. Hochfrequenz-Stroboskop mit LED-Lichtquelle. *Tech. Messen*, 1984.
- [2] M. Bleicher. *Halbleiter-Optoelektronik*. Verl. Technik, Berlin, 1986.
- [3] J. Krückeberg. *Hochleistungs-LEDs in der Praxis*. Franzis, Poing, 2007.
- [4] *Innovative Beleuchtung mit LED: 5. Fachtagung, 27. bis 28. November 2007, Düsseldorf*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007.
- [5] T. Welker. Lumineszierende Materialien und ihre technische Anwendung, Vorlesung am Institut für Angewandte Optik und Elektronik. Fakultät IME , 2006.
- [6] W. Bludau. *Halbleiter-Optoelektronik*. Hanser, München, Wien, 1995.
- [7] Lumileds Lighting, LLC, San Jose. *Luxeon V Star Technical Datasheet*, DS30, 2002.
- [8] Luminus Devices, Inc. *Phlatlight Product Data Sheet CBT-120 Series*, 2008.
- [9] B.E.A. Saleh und M.C. Teich. *Grundlagen der Photonik*. WILEY-VCH, Weinheim, 2008.
- [10] Philips Lumileds Lighting Company. *Luxeon III Star Technical Datasheet*, DS46, 2006.
- [11] Luminus Devices, Inc. *Phlatlight Product Data Sheet CBT-40 Series*, 2008.
- [12] *Handbuch der LED-Messtechnik*. Systems GmbH, München.
- [13] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, und J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry - A practical guide*. Springer, Berlin Heidelberg, 2 edition, 2007.
- [14] C. Tropea, A. Yarin, und J. Foss. *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer, Berlin Heidelberg, 2007.

- [15] R. Lindken, W. Merzkirch. A novel piv technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in Fluids*, 2002.
- [16] L. Goss, J. Estevadeordal, und J. Crafton. Kilo-hertz color particle shadow velocimetry (psv). *AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2007.
- [17] S. M. Hagsäter, C. H. Westergaard, H. Bruus, und J. P. Kutter. Investigations on led illumination for micro-piv including a novel front-lit configuration. *Exp Fluids (2008)*, 2007.
- [18] C. Willert, S. Moessner, und J. Klinner. Pulsed Operation of High Power Light Emitting Diodes for Flow Velocimetry. 2009.
- [19] B. Futterer, M. Gellert, und C. Egbers. Das geoflow-experiment auf der iss: Simulation optischer Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. *Fachtagung: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 2005.
- [20] E. Hering, R. Martin. *Photonik: Grundlagen, Technologie und Anwendungen*. Springer, 2005.
- [21] U. Meier, J. Heinze, und C. Hassa. Response of spray and heat release to forced air flow fluctuations in a gas turbine combustor at elevated pressure. 2007.
- [22] R. Messerschmid. Zerstäubung von Flüssigkeiten in einer nicht angepassten Lavaldüse. 2004.
- [23] F. Klinge. *Vermessung von Wirbeln mit der Hintergrundsclieren-Methode*. 2003.
- [24] G. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, und B. van Oudheusden. Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 2006.
- [25] M. Kühn, K. Ehrenfried, J. Bosbach, und C. Wagner. Application and validation of large scale tomographic piv in a long rectangular convection cell. In *8th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV09)*, 2009.
- [26] F. Pereira, H. Stuer, E. Graff, und M. Gharib. Two-frame 3d particle tracking. *Measurement Science and Technology*, 2006.
- [27] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, und H. Schmidt. *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2005.

- [28] PicoLas GmbH, Aachen. *PicoLas Users Manual LDP-V 50-100 V3*, 2008.
- [29] THORLABS, Inc., Newton. *PDA10A Operating Manual - Wideband Amplified Silicon Detector*, 2005.

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbst verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Köln, 28. Oktober 2009

---

(Steffen Mößner)